

Modellbildung und Regelung von Luft-Öl-Gemischen

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Marcus Gerbrandt

aus Salzgitter-Bad

Eingereicht am:	2. Dezember 2009
Mündliche Prüfung am:	27. April 2010
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. W. Schumacher
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. H.-H. Harms

2010

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig. Mein Dank gilt besonders Prof. Dr.-Ing. Walter Schumacher, der mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat.

Für die Übernahme der Mitberichterstattung danke ich herzlich Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms vom Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Meinerzhagen danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein herzliches Dankeschön geht an Dipl.-Ing. Bernd Amlang, der mich während meiner Zeit am Institut im gemeinsamen Büro begleitet hat, für die Unterstützung und aufmunternden Worte. Bei Dipl.-Ing. Michael Kolbus und Dipl.-Ing. Frank Wobbe möchte ich mich für die zahlreichen Diskussionen und Ratschläge bedanken. Andreas Rusniok danke ich für die prompte und sorgfältige Produktion der Maschinenelemente. Bei allen Mitarbeitern des Instituts bedanke ich mich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und offene Arbeitsatmosphäre.

Dipl.-Ing. Frank Schreiber, Maik Deede und Wolfram Lipinski danke ich für das sorgfältige Korrekturlesen, die vielen wertvollen Hinweise und die stetigen Ermutigungen.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Schwester bedanken, die mir in schwierigen Zeiten ein sicherer Rückhalt waren und so wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Salzgitter im Mai 2010

Marcus Gerbrandt

Kurzfassung

In hydraulischen Systemen stellt freie Luft auch heute noch eine technische Herausforderung dar. Durch die Weiterentwicklung der Komponenten entstehen immer leistungsfähigere Öle, die für ihren Einsatz spezielle Eigenschaften aufweisen. Da das Verschäumungsverhalten von Ölen nur über empirische Messverfahren ermittelt werden kann, werden zur Zeit mehrere Schaumtestverfahren für die verschiedenen Einsatzgebiete von Ölen genutzt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Luftgehalt im Öl für einen reproduzierbaren Schaumaufbau in einem Laborgerät auf eine gewählte Führungsgröße zu regeln. Dabei werden die Bedingungen einer mobilhydraulischen Anlage nachbildet. Deshalb werden das Laborgerät sowie die Sensorik zur kapazitiven Bestimmung des Luftgehaltes entwickelt.

Schwerpunkte liegen sowohl im konstruktiven Aufbau des Hydraulikkreises sowie der Einbringung der Luft ins Öl, als auch in der Bestimmung des Luftaufnahmeverhaltens von Ölen zur Modellbildung und Reglerauslegung. Durch das neuartige Verfahren der Luftgehaltsregelung und den Einsatz von spezieller Sensorik lassen sich Öle reproduzierbar und praxisnah aufschäumen.

Abstract

Even today free air is a technical challenge for hydraulic systems. Due to a further development of the components increasingly powerful oils have been developed, specifically tailored to their application. Currently specific foam test procedures are used for the different applications, because the foaming properties can only be evaluated by empirical methods.

In this thesis the following approach for the test procedure is proposed: The content of air dissolved in the oil is controlled at constant value. In this way it is possible to reproduce the foam composition in a laboratory set up. A capacitive sensor for measurement of the content of free air is developed.

The design of the hydraulic circuit, the injection of air into the oil, and the evaluation of air absorption is modelled and a controller design is presented. The procedure exhibits excellent repeatability in accordance with practical requirements, due to the novel control of air content and the use of a specially designed sensor system.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik bei Ölprüfverfahren	3
2.1 Prüfung nach DIN 51566	4
2.2 Prüfung nach ASTM D 892	5
2.3 Prüfung nach DIN 51381	7
2.4 Flender-Schaumtest	9
2.5 Prüfung nach ISO 9120	12
2.6 Schaumtestverfahren für Automatikgetriebe	14
2.7 Vergleich der vorgestellten Verfahren	15
2.8 Motivation	16
3 Laborgerät zur Bestimmung des Luftabscheidevermögens	19
3.1 Konzeption des automatisierten Prüfstandes	19
3.1.1 Aufbau des Hydraulikkreislaufs	20
3.1.2 Architektur der Prozessrechner	21
3.2 Modellbildung und Regelung	27
3.2.1 Modellbildung des Systems mit Lineardrossel	29
3.2.2 Regelung des Systems mit Lineardrossel	33
3.2.3 Charakteristik der Einspritzdüse	47
3.2.4 Topologie des Systems mit Einspritzdüse	50
3.2.5 Modellbildung des Systems mit Einspritzdüse	52
3.2.6 Einsatz von Beobachtern	60
3.2.7 Regelung des Systems mit Einspritzdüse	63
3.3 Fazit	73
4 Sensorik zur Luftgehaltsbestimmung	75
4.1 Messverfahren	75
4.1.1 Fördermenge einer Pumpe	76
4.1.2 Optische Verfahren	77
4.1.3 Schallgeschwindigkeitsmessung	77
4.1.4 Kapazitive Messung	78
4.2 Bestimmung der effektiven Dielektrizitätszahl	82
4.3 Plausibilitätsüberprüfung und Temperaturabhängigkeit	84
4.4 Kapazitätsauswertung	86

5	Versuchsstand zur Luftgehaltsregelung	89
5.1	Einspritzung	90
5.1.1	Kanüledurchmesser und Position der Einspritzung	90
5.1.2	Leitungsquerschnitt und –länge	94
5.1.3	Einspritzdruck	95
5.1.4	Ergebnisse und Vergleich	95
5.2	Untergeordnete Regelungen	98
5.2.1	Druckregelung	98
5.2.2	Regelung der Einspritzdüse	99
6	Modellbildung, Identifikation und Regelung	103
6.1	Messungen zur Identifikation	103
6.2	Modellbildung	105
6.3	Luftgehaltsregelung	111
6.3.1	PI-Regler	112
6.3.2	Smith-Prädiktor	113
6.3.3	Smith-Prädiktor mit Führungsfilter	117
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
A	Laborgerät	121
B	Versuchsstand	135
B.1	Kapazitäten der identifizierten Öle	135
B.2	Messungen zur Identifikation	135
	Literatur	139

Bildverzeichnis

3.1	Hydraulikschaltplan der Prüfvorrichtung	21
3.2	Systemtopologie	22
3.3	Ablaufsteuerung der Anlage	24
3.4	Bedienoberfläche unter DASYLab	25
3.5	Blockschaltbild mit SPS und linearem Drosselventil	27
3.6	Vergleich von Strecke und Modell bei sprungförmiger Anregung und Verlauf der gemessenen Schaumhöhe	31
3.7	Bodediagramm des Streckenmodells	32
3.8	Regelung des Luftgehaltes mit Abweichungen bis zu ± 1 Vol.-%	33
3.9	Regelung des Luftgehaltes mit Abweichungen bis zu ± 1 Vol.-% und monoton steigender Schaumhöhe	34
3.10	Vergleich der Luftgehalts- und Schaumhöhenverläufe zweier Messungen . . .	35
3.11	Unterdruck und Volumenstrom der Vergleichsmessung zur Eingrenzung des Fehlers im Luftgehaltsverlauf	36
3.12	Luftgehaltsregelung mit zu stark schwankendem Luftgehalt und nicht monoton steigendem und somit nicht reproduzierbarem Schaumaufbau	37
3.13	Unterdruck und Volumenstrom zu den Messungen aus Bild 3.12	38
3.14	Einschwingverhalten führt zu nicht reproduzierbarer Schaumhöhe	39
3.15	Untersuchung des Verhaltens bei anfänglich gestelltem Einbringen der Luft .	40
3.16	Entstehender Unterdruck und die Auswirkungen des Volumenstroms auf den Luftgehalt	41
3.17	Kurzzeitige Spitzen, die teilweise den Schaumaufbau beeinflussen	42
3.18	Fehlfunktion des Stellgliedes verhindert die Regelung des Luftgehaltes und führt zu nicht reproduzierbarem Schaumaufbau	44
3.19	DT ₁ -ähnliche Abweichungen im Luftgehalt und die Auswirkungen auf die Schaumhöhe	45
3.20	Spitzen im Luftgehalt im Zusammenhang mit Druck und Volumenstrom . . .	46
3.21	Versuchsanordnung zur Vermessung der Einspritzdüse	48
3.22	Volumenstrom für unterschiedlichen Reduzierhülsendurchmesser d	49
3.23	Neue Systemtopologie	50
3.24	PFM-Ansteuerung der Einspritzdüse	51
3.25	Hammerstein-Modell	52
3.26	Hammerstein-Wiener-Modell	52
3.27	Wiener-Modell	52
3.28	Wiener-Hammerstein-Modell	52
3.29	Nichtlineares Differentialgleichungsmodell	52
3.30	Blockschaltbild nach dem Umbau mit DSP und Einspritzdüse	53

3.31	Kopplungseffekte von Streckendruck und Luftgehalt	54
3.32	Kurzer Identifikationsablauf	55
3.33	Erwarteter Luftgehalt für eine Identifikation	56
3.34	Nichtlineare Modellstruktur mit PT_1 -Glied und Totzeit	57
3.35	Nichtlineare Modellstruktur mit PT_2 -Glied	57
3.36	Vergleich der Antworten der Strecke und der Modelle	58
3.37	Vergleich des PT_1 -Totzeit-Modells mit dem PT_2 -Modell	59
3.38	Strecke mit parallelem Modell	60
3.39	Luenberger Beobachter	61
3.40	Störbeobachter	62
3.41	Beobachtergestützte Regelung	64
3.42	Messdatenaufbereitung mit Tiefpassfilter	64
3.43	Vergleich verschiedener Messreihen eines Öls	65
3.44	Geforderte Einschwingdauer wird bei sprungförmiger Anregung überschritten	66
3.45	Überschreiten der geforderten Einschwingdauer bei rampenförmiger Anregung	67
3.46	Schaumaufbau bei unterschiedlicher Führungsgrößenvorgabe	68
3.47	Luftgehalts- und Schaumhöhenverlauf eines nicht regelbaren Luftgehaltes . .	69
3.48	Zwei detektierte Fehler im Luftgehalt	70
3.49	Luftgehalt und Schaumaufbau	71
3.50	Verschlussstopfen: Luftgehalt und Schaumaufbau	72
4.1	Ausreißer im Luftgehalt sind nicht im Druckverlauf erkennbar	77
4.2	Messaufbau Ultraschall	78
4.3	Kondensator	79
4.4	Kapazitätsverläufe	81
4.5	Kondensatorabschnitt mit Luft-Öl-Gemisch	82
4.6	Kubisch-primitives Gittermodell	83
4.7	Vergleich der berechneten Kapazitäten	85
4.8	Temperaturabhängigkeit des Kondensators	86
4.9	Kapazitätsbestimmung	87
4.10	Kondensatoranordnung	88
5.1	Topologie des neuen Versuchsstandes	89
5.2	Lufteinbringung mit Kanüle	91
5.3	Ermittlung des optimalen Einspritzpunktes	92
5.4	Position E3: Einspritzung in die Pumpenkammer	93
5.5	Elektrisches Analogon zum Strömungswiderstand der Schlauchleitung	94
5.6	Hydraulikkreis des Versuchsstandes	96
5.7	Druckregelkreis für den Arbeitspunkt	98
5.8	Druckverlauf bei Umschaltung der Führungsgröße	99
5.9	Ansteuerungssignal der Einspritzdüse	99
5.10	Sprungförmige Anregung der Einspritzdüse ohne Regler	100
5.11	Sprungantwort der Einspritzdüse mit Regler	101
5.12	Synchronisation der Regelung auf die Kammern	101
5.13	Regelung der Einspritzdüse	102

6.1	Hammerstein-Prozessmodell für den Prüfstand	103
6.2	Luftgehalts- und Druckverlauf einer Identifikation	104
6.3	Sprungantworten bei verschiedenen Anregungsamplituden	105
6.4	Verschiedene Messungen mit gleicher Anregung	106
6.5	Lineares Modell	107
6.6	Sprungantworten des Modells und des Systems	108
6.7	Bodediagramm des Teilmodells mit und ohne Totzeit	109
6.8	Zeitkonstanten	110
6.9	Verstärkungsfaktoren	110
6.10	Einfluss des Streckendrucks auf den Luftgehalt	111
6.11	Luftgehaltsregelung mit einem fest eingestellten PI-Regler	112
6.12	Smith-Prädiktor. Im Modell wird die schnelle PT_1 -Dynamik berücksichtigt, der Einfluss des PT_2 -Gliedes wird als Störung aufgefasst.	113
6.13	Smith-Prädiktor mit Arbeitspunktanpassung	114
6.14	Luftgehaltsregelung mit Smith-Prädiktor (I-Regler)	116
6.15	Luftgehaltsregelung mit Smith-Prädiktor (PI-Regler)	116
6.16	Smith-Prädiktor mit Führungsfilter	117
6.17	Luftgehaltsregelung mit Smith-Prädiktor und Führungsfilter	118
A.1	HLP 46	122
A.2	HLP 46 LS	123
A.3	HLP 46 LS gebraucht	124
A.4	Utto LS	125
A.5	Utto 100 h	126
A.6	Basic 68	127
A.7	Basic 100	128
A.8	DU 46	129
A.9	ZAF 46 MB	130
A.10	ZAF 46 MC	131
A.11	Gear ATF	132
A.12	Plus Arctic	133
B.1	Renolin B 15 VG 46	136
B.2	Renolin MR 46 MC	137
B.3	Hydraulik HVI	138

Tabellenverzeichnis

2.1	Zeitspanne zwischen zwei Dichtebestimmungen	9
2.2	Schaumverhalten von Ölen	11
2.3	Temperaturen beim Impingerverfahren	12
2.4	Vergleich der Verfahren	16
3.1	Beurteilungskriterien der Regelungen im Überblick	28
3.2	Bohrungsdurchmesser und –querschnitt der Reduzierhülsen	47
3.3	Kosten–Nutzen–Analyse	51
4.1	Dielektrizitätszahlen unterschiedlicher Öle und daraus resultierende Kapazitäten	80
4.2	Messwertstreuung	85
5.1	Verwendete Einwegkanülen	91
5.2	Leitungsdurchmesser	94
5.3	Vergleich der beiden Anlagen	97
A.1	Messreihen der Öle	121
B.1	Kapazitäten und Dielektrizitätskonstanten der identifizierten Öle	135

Symbolverzeichnis

Allgemein

Zeichen	Größe
a	Skalar
\underline{a}	Vektor
$\underline{\underline{A}}$	Matrix
A_i	Variable A mit zusätzlicher Bezeichnung i
ΔA	Differenzgröße der Variablen A
\dot{a}	Zeitliche Ableitung: $\frac{da}{dt}$
\hat{a}	geschätzte Größe a
\tilde{a}	Schätzfehler a
$f(x)$	Funktion von x
t	Zeit

Regelungstechnik

Zeichen	Größe
D	Dämpfung
$F(s), G(s)$	Übertragungsfunktion eines SISO-Systems
T	Zeitkonstante des Systems
V	Verstärkungsfaktor des Systems
X	Stellgröße
\mathcal{NL}	Nichtlinearität
\underline{e}	Fehlervektor
\underline{u}	Eingangsvektor
\underline{x}	Zustandsgrößen

$\hat{\underline{x}}_D$	Zustandsgrößen des Störmodells
\underline{y}	Ausgangsvektor
$\hat{\underline{y}}$	Ausgangsvektor des Störbeobachters
$\hat{\underline{y}}_D$	Ausgangsvektor des Störmodells
$\underline{\underline{A}}$	Systemmatrix
$\underline{\underline{A}}_D$	Systemmatrix des Störmodells
$\underline{\underline{B}}$	Eingangsmatrix
$\underline{\underline{C}}$	Ausgangsmatrix
$\underline{\underline{C}}_D$	Ausgangsmatrix des Störmodells
$\underline{\underline{H}}$	Zustandsrückführung
$\underline{\underline{H}}_D$	Zustandsrückführung des Störmodells
$\underline{\underline{L}}$	Zustandsrückführung

Elektrotechnik

Zeichen	Einheit	Größe
α_A	1	Ansteuerungsgrad der PFM/PWM
C	F	Kapazität
\underline{D}	C/m ²	elektrische Flussdichte (Verschiebungsdichte)
\underline{E}	V/m	elektrische Feldstärke
ϵ	F/m	Permittivität
f	Hz	Frequenz
I	A	Strom
n	1/min	Motordrehzahl
Q	C	Ladung
T	°C, K	Temperatur
U	V	Spannung

Hydraulik

Zeichen	Einheit	Größe
A	m ²	Fläche
c	Vol.-%	Luftgehalt

d	m	Durchmesser
ds	m	Weginkrement
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
l	m	Länge
m	kg	Masse
p	Pa	Druck
$\phi(L)$	Vol.-%	Volumenanteil
R_s	J/(kg K)	spezifische Gaskonstante
ρ	g/ml, kg/m ³	Dichte
V	l, m ³	Volumen
\dot{V}	l/min, m ³ /s	Volumenstrom

Thermodynamik

Zeichen	Einheit	Größe
α_P	A s m ² /V	Polarisierbarkeit
ϵ_0	F/m	Dielektrizitätskonstante
ϵ_r	1	relative Permittivität
f	1	Füllfaktoren
N	1/m ³	Teilchendichte
$\underline{E}_{\text{lokal}}$	V/m	lokale elektrische Feldstärke
\underline{P}	A s/m ²	Polarisation

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge Coupled Device
CGS	Concentration Gas Sensor
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DSP	Digitaler Signal-Prozessor
DT ₁	Differenzierglied mit Verzögerung
HFAC	Hexafluoroacetylacetonat
HFAE	Öl in Wasser Emulsion
HFAS	Mineralölfreie wässrige Lösung
HFC	Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
ISO	International Organization for Standardization
IT ₁	Verzögerter Integrator
LAV	Luftabscheidevermögen
PWM	Pulsweitenmodulation
PFM	Pulsfrequenzmodulation
PT ₁	Verzögerungsglied 1. Ordnung
PT ₂	Verzögerungsglied 2. Ordnung
PT100	Temperaturfühler, die auf Widerstandsänderungen von Platin basieren
RS-232	Standard für eine serielle Schnittstelle
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol

1 Einleitung

Das technische Einsatzfeld von Ölen ist weitreichend. Sie werden in der Elektrotechnik beispielsweise zur Isolierung und Kühlung eingesetzt und im Maschinenbau zusätzlich zur Schmierung und als Hydraulikfluid. Durch den Einsatz von Schmierstoffen werden zum einen der Materialverschleiß und zum anderen die Reibung verringert. Befindet sich Luft in nicht gelöster Form im Öl, dann bildet sich kein durchgängiger Schmierfilm. Kommt es dabei zum direkten Kontakt der Reibflächen, so steigen Reibung und Verschleiß.

In Ölen ist Luft in gelöster Form vorhanden, welche bei Störung des Gleichgewichtszustands austritt und zu Schaumbildung führt. Darüber hinaus kann von außen Luft in das System gelangen und so zu einem Luft–Öl–Gemisch führen. Beides verringert unter anderem die Schmierwirkung des eingesetzten Öls und führt somit zur verstärkten Abnutzung der Aggregate. Durch die Weiterentwicklung und steigende Komplexität der Aggregate werden immer höhere Anforderungen an die Komponente Öl gestellt, die zusätzlich mit der Verwendung variieren.

Da sich selbst durch den Einsatz von Additiven zur Schaumunterdrückung eine Schaumbildung nicht vollständig vermeiden lässt, muss für die qualitative Beurteilung Kenntnis über das Luftabscheidevermögen des Öls gewonnen werden. Je nach Einsatzgebiet sind Verfahren entwickelt worden, die empirisch das Luftabscheidevermögen bestimmen und bewerten, da die komplexen Vorgänge bei der Luftabscheidung analytisch nicht beschreibbar sind. Die einzelnen Verfahren werden bezüglich ihrer Verwendung und ihrer technischen Umsetzung analysiert.

Für die Schaumbildung und die Bestimmung des Luftabscheidevermögens von Hydraulikölen, insbesondere für den Einsatz bei mobilen Maschinen, wird ein Laborgerät entwickelt, das die Bedingungen einer realen Maschine im Labor nachbildet. Während in [Lei07] die Analyse des Schäumungsverhaltens von Ölen und das Konzept des Hydraulikkreislaufs detailliert erläutert werden, liegt hier der Schwerpunkt auf der Messung des Luftgehaltes, der Modellbildung sowie der Regelung.

Im Rahmen dieser Untersuchung sind nacheinander zwei Vorrichtungen zur Luftgehaltsregelung entwickelt worden, diese werden im Weiteren zur Unterscheidung als das Laborgerät und der Versuchsstand bezeichnet. Dabei stellt der Versuchsstand eine Weiterentwicklung basierend auf den Erkenntnissen aus den Untersuchungen am Laborgerät dar.

Das Laborgerät wird ausgehend vom Hydraulikkreislauf und der Systemtopologie vorgestellt, anschließend werden die Modellbildung und Parameteridentifikation durchgeführt. Die Innovationen bei diesem Verfahren zur Schaumbildung sind der geregelte Luftgehalt über den Verschäumungszeitraum, die computergestützte Aufzeichnung von Schaumaufbau und -zerfall [Tut04] sowie der automatisierte Ablauf einer Untersuchung. Dazu wird mit spezieller Sensorik der Luftgehalt ermittelt und es werden die übrigen Systemparameter gemessen. Als Stellglieder werden ein lineares Drosselventil sowie eine Einspritzdüse eingesetzt und verglichen. Durch den Einsatz von Regelungstechnik wird die Luft so ins Öl eingebracht, dass sich ein konstanter Luftgehalt einstellt. Dabei werden sowohl konventionelle als auch beobachtergestützte Regelungen verwendet und bewertet.

Am Versuchsstand werden sowohl die Luftgehaltsregelung als auch die Eigenschaften des hydraulischen Kreislaufs untersucht, auf eine Sensorik zur Auswertung des Luftabscheidungsvermögens ist verzichtet worden. Es handelt sich um einen nichtlinearen Transportprozess mit einem Luft-Öl-Gemisch als transportiertem Medium. Da sich die systembedingte Totzeit negativ auf die Regelbarkeit auswirkt, wird diese minimiert. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Sensorik und der Aufbau des Hydraulikkreises sich auf die Qualität der Regelung auswirken. Zur Verbesserung der Resultate wird zum einen ein kapazitiver Sensor zur Bestimmung des Luftgehaltes entwickelt, zum anderen werden sowohl der Hydraulikkreislauf als auch die Lufteinbringung systematisch überarbeitet. Ausgehend von diesen Neuerungen wird nicht nur der Luftgehalt, sondern auch der Systemdruck geregelt. Diese Modifikationen werden detailliert erläutert und die Modelle sowie ihre Parameteridentifikation betrachtet. Anschließend werden die eingesetzten Regelungen dargestellt.

2 Stand der Technik bei Ölprüfverfahren

Öle kommen in unserer hochtechnologisierten Welt in vielen Bereichen zum Einsatz. Einige werden zum Schmieren in der Antriebs- und Produktionstechnik, andere als Kühlmittel und Isolatoren verwendet. Je nach dem Einsatzgebiet variieren die Anforderungen an das verwendete Öl und seine Eigenschaften müssen daran angepasst werden. Normen existieren für die verschiedensten Anwendungen von Ölen, meist für Schmier- und Regleröle nach DIN 51515 Teil 1 und Hydrauliköle nach DIN 51524 Teil 1 und 2. Im weiteren Text werden diese Erzeugnisse kurz „Öle“ genannt.

Im Bereich der Automobile und der mobilen Arbeitsmaschinen werden Öle in den verschiedenen Aggregaten als Schmier- und Kühlmittel oder zur Energieübertragung eingesetzt. Dabei variiert unter anderem die Viskosität je nach Anwendungsbereich und Temperatur. Die gewünschte Funktion des Öls muss dabei aber ohne Einschränkungen gewährleistet werden. Durch Beimischen verschiedener Stoffe zum Öl lassen sich dessen Eigenschaften zur Anpassung an die jeweilige Anwendung verändern. Es tritt jedoch als unerwünschter Nebeneffekt ein Aufschäumen der Öle unter anderem durch die Scherung im Getriebe oder durch starke Druckschwankungen auf. Je stärker dieser Effekt auftritt, d.h. je stärker sich Luftbläschen bilden, die für lokale Unterbrechung des Schmierfilms sorgen, desto geringere Schmiereigenschaften weist das Öl auf und desto mehr nimmt die Abnutzung an den Reibflächen der Zahnräder zu.

Bei einer geeigneten Additivierung ergibt sich eine hohe Tragfähigkeit der Zahnräder gegen Fress- und Pittingschäden auf der Zahnflanke, jedoch haben die Additive einen Einfluss auf die Alterungsbeständigkeit und das Schaumverhalten des Öls. Ziel ist es, ein Optimum zwischen minimalen Schäden und gutem Schaumverhalten zu finden. Wird beim Additivieren ein ungünstiges Mischungsverhältnis oder eine unpassende Kombination der Additive gewählt, so tritt ein überhöhtes Schaumverhalten auf, was die Tragfähigkeit wiederum negativ beeinflusst. Bei Getriebeölen führt eine überhöhte Schaumbildung zu Ölaustritt an den Wellendichtungen und Entlüftungsschrauben.

Für die Hersteller von Motoren und Getrieben stellt sich daher die Frage, welche Öle sich zur Schmierung ihrer Produkte eignen, wie sich das Luftabscheideverhalten bestimmen lässt und wie die Öle in dieser Hinsicht zu klassifizieren sind. Hierzu sind schon einige Verfahren entwickelt und zum Teil in Normen aufgenommen worden. Diese Verfahren lassen sich grob in statische und dynamische Prüfverfahren unterteilen.

Im folgenden Abschnitt werden Aufbau und Durchführung der verschiedenen Verfahren vorgestellt. Bezüglich der jeweiligen Vorbereitung und Reinigungsprozedur wird hier auf die Normen verwiesen.

2.1 Prüfung nach DIN 51566

Die DIN 51566 bezieht sich auf Schmieröle und ähnliche Erzeugnisse und ist nur eingeschränkt auf Öle mit hoher Viskosität anwendbar. Das dort verwendete Verfahren bestimmt das Luftabscheidevermögen für ruhende Öle, bei denen die Luftblasen zur Oberfläche aufsteigen und schätzt dann das Verhalten der Öle in der Anwendung ab.

Für den Prüfaufbau werden folgende Geräte benötigt:

- Luftquelle
Eine geregelte Luftquelle für saubere, ölfreie, trockene Luft, die einen Luftstrom von $94 \text{ ml/min} \pm 5 \text{ ml/min}$ aufrecht erhalten kann.
- Strömungsmessgerät
Hiermit kann der Luftstrom von $94 \text{ ml/min} \pm 5 \text{ ml/min}$ gemessen und eingestellt werden.
- Schaumbläser
Der Schaumbläser besteht aus einer Luftzuleitung an dessen Ende ein Diffusor angebracht ist.
- 1 l-Messzylinder
- Thermostate
Drei Wasserbäder in denen der 1 l-Messzylinder auf der jeweiligen Temperatur ($25^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ oder $95^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$) gehalten werden kann.

Der Prüfablauf wird in drei Schritten durchgeführt.

1. Bestimmung bei 25 °C

Eine Probe des Öls (190 ml) wird auf 50 °C erwärmt und bei dieser Temperatur 30 min bis 60 min gehalten. Anschließend wird das Öl auf 25 °C abgekühlt und der Diffusor eingebracht. Nach einer Ruhephase von mindestens 5 min wird die Luftzufuhr angeschlossen und ein Luftstrom von $94 \text{ ml/min} \pm 5 \text{ ml/min}$ eingeleitet. Spätestens 75 min nach der Entnahme aus dem Wasserbad (50 °C) muss mit dem Einleiten der Luft begonnen werden. Sollte sich während des Prüflaufs der am Boden des Gefäßes befindliche Diffusor durch starke Schaumbildung teilweise im Schaum befinden, so ist der Luftstrom nachzustellen. Nach $300 \text{ s} \pm 3 \text{ s}$ wird die Luftzufuhr abgestellt und das Schaumvolumen zwischen Luft- und Ölschicht gemessen. Ist keine geschlossene Oberfläche vorhanden, so werden 0 ml für das Volumen angesetzt. Ansonsten wird von einem Mindestvolumen von 10 ml ausgegangen. Nach weiteren 5 min wird das Schaumvolumen erneut bestimmt.

2. Bestimmung bei 95 °C

Der Versuchsaufbau wird gereinigt und mit einer neuen Probe des gleichen Öls (180 ml) die Messung bei 95 °C wiederholt. Die Aufheizphase wird hier auf 30 min bis 35 min verkürzt. Die Luft muss spätestens nach 45 min eingeleitet werden, ansonsten wird die Messung wie bei 25 °C beschrieben durchgeführt.

3. Bestimmung bei 25 °C nach der Bestimmung bei 95 °C

Für die letzte Messung bei 25 °C wird nun das Öl der 95 °C Messung mit dem Diffusor so verrührt, dass sich die entstandene Schaumsäule auflöst aber keine Luft beim Rühren unter das Öl gelangt. Das am Diffusor anhaftende Öl wird in den Messzylinder überführt und das Öl für 60 min auf 95 °C erhitzt. Nach einer Ruhephase von 15 min bis 30 min bei Raumtemperatur wird die Ölprobe für 30 min bis 45 min auf 25 °C erwärmt. Mit dem gereinigten Diffusor wird dann wie bei der ersten Messung die abschließende Prüfung vorgenommen.

2.2 Prüfung nach ASTM D 892

Die ASTM D 892 beschreibt den Versuchsaufbau und die Durchführung zur Bestimmung des Schäumungsverhalten von Ölen, vergleichbar der DIN 51566 [DIN83]. Die Unterschiede zwischen beiden Verfahren sind minimal, so sind unter anderem die Temperaturen bei den einzelnen Messungen unterschiedlich oder die Abläufe werden bei der ASTM D 892 präziser vorgegeben.

Für den Prüfaufbau werden folgende Geräte benötigt:

- Luftquelle
- Strömungsmessgerät
Hiermit kann der Luftstrom von $94 \text{ ml/min} \pm 5 \text{ ml/min}$ gemessen und eingestellt werden.
- Schaumbläser
Der Schaumbläser besteht aus einer Luftzuleitung an deren Ende ein Diffusor angebracht ist.
- 1 l-Messzylinder
- Thermostate
Diese bestehen aus zwei Wasserbädern, in denen der 1 l-Messzylinder auf der jeweiligen Temperatur ($24^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ oder $93,5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$) gehalten werden kann.
- Luftmengenmesser
Dieser dient zur Erfassung der entweichenden Luft aus dem Messzylinder der Anlage.
- Stoppuhr
- geeignetes Thermometer

Die Bestimmung des Schäumungsverhaltens unterteilt sich in drei Vorgänge.

1. Auswertung der Probe (190 ml) bei 24°C

Zuerst werden 200 ml Öl auf $49^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ im Wasserbad temperiert und anschließend auf $24^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ abgekühlt. Danach werden 190 ml des Öls in den 1 l-Messzylinder umgefüllt und im Wasserbad auf $24^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ erwärmt. Wenn das Öl die Temperatur erreicht hat, wird der Diffusor in das Öl eingebracht und nach 5 min an die Luftzufuhr angeschlossen. Für $300 \text{ s} \pm 3 \text{ s}$ bei $94 \text{ ml/min} \pm 5 \text{ ml/min}$ wird die Luft in das Öl eingebracht. Abschließend wird die entwichene Luftmenge und das bestehende Schaumvolumen zwischen Luft und Öl bestimmt. Die Luftmenge sollte hier um 470 ml liegen. Nach $600 \text{ s} \pm 10 \text{ s}$ wird dann nochmals das Schaumvolumen bestimmt und die Messung ist beendet.

2. Auswertung der Probe (180 ml) bei $93,5^\circ\text{C}$

Eine zweite Probe des Öls wird auf $93,5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ erhitzt. Es wird ein sauberer Diffusor eingebracht und, wie unter 1. beschrieben, das Luftabscheideverhalten des Öls bestimmt.

3. Zweite Auswertung der Probe von 2. bei 24 °C

Die zweite Probe wird im Anschluss der Messung ein weiteres Mal untersucht. Dazu wird vorab der Schaum durch Rühren zerstört. Das Öl wird dann bei Zimmertemperatur bis auf 43,5 °C abgekühlt und schließlich im Wasserbad auf 24 °C \pm 0,5 °C temperiert. Sobald das Öl die gewünschte Temperatur erreicht hat, wird wie unter 1. die Messung gestartet.

2.3 Prüfung nach DIN 51381

Wie bei den vorangegangenen Verfahren wird auch hier das Luftabscheidevermögen von Ölen bestimmt. Im Gegensatz hier jedoch nicht über die Volumenauswertung des Schaumes, sondern über eine Dichtebestimmung. Der Aufbau gliedert sich in zwei Teile: Die Luftaufbereitung und die Ölprüfung. Die erforderlichen Gerätschaften sind nachfolgend aufgelistet.

1. Luftaufbereitung

- Temperiereinrichtung
Zum Erwärmen der Druckluft auf die Öltemperatur ($\pm 1,0$ °C)
- Druckmessgerät
Mit einem Messbereich von 0 kPa bis 33,5 kPa
- Laborthermometer
Von 0 °C bis 100 °C mit einer Skaleneinteilung von 0,2 °C

2. Ölprüfung

- Prüfgefäß
Das Gefäß besteht aus dem eigentlichen Probengefäß mit Lufteinlassstutzen und Prellplatte, sowie einem Heizgefäß mit Anschlüssen für das Umlaufthermostat.
- Umlaufthermostat
Das Thermostat sollte eine Kapazität von 10 l und einen Temperierbereich von 20 °C bis 100 °C ($\pm 0,1$ °C) aufweisen. Zum Temperieren des Öls sollte die Heizflüssigkeit mit 10 l/min durch die Anordnung geleitet werden.
- Wärmeschränk
- 250-ml-Messzylinder

- Hydrostatische Waage

Auf 0,001 g/ml genau, mit Senkkörper an einem Platindraht

Die Bestimmung des Luftabscheideverhaltens unterteilt sich in drei Abschnitte.

1. Vorbereitung des Öls

Das zu untersuchende Öl wird im Wärmeschrank auf eine um 10 °C höhere Temperatur als bei der Verschäumung erhitzt und anschließend gut durchgeschüttelt. Danach werden 190 ml der erwärmten Probe in das Probengefäß überführt und auf die Prüftemperatur von 50 °C temperiert. Die hydrostatische Waage wird zentrisch über dem Probengefäß angebracht und der Senkkörper am Platindraht bis auf 10 mm (± 2 mm) über dem Boden in das Öl abgesenkt. Die Dichte wird auf 0,001 g/ml ($= \text{kg/m}^3$) bestimmt. Sollte sich innerhalb von 5 min keine Änderung der Öldichte ergeben, so ist die Grunddichte (ρ_0) ermittelt und der Senkkörper kann entnommen, gereinigt und für die spätere Anwendung auf die erforderliche Temperatur erwärmt werden.

2. Verschäumung und Dichtebestimmung

Vorbereitend wird nach der DIN 51381 der Lufteinlassstutzen mit Düse auf das Probengefäß aufgesetzt und mit der Luftzufuhr verbunden. Nach 5 min wird die Luft mit einem Druck von 200 kPa ($\pm 0,5$ kPa) ins Öl eingeleitet. Bei Druckschwankungen ist hier entsprechend nachzuregeln. Nach 420 s (± 1 Sekunde) wird die Luftzufuhr gestoppt und der Lufteinlassstutzen zügig abgenommen. Die dabei auftretenden Ölverluste sind möglichst gering zu halten. Der vorgewärmte Senkkörper wird auf die vorgegebene Messtiefe in die Luft-Öl-Dispersion ausgerichtet. Nach einer Minute wird der erste Dichtewert notiert. Die weiteren Intervalle der Dichtebestimmung sind der Tabelle 2.1 zu entnehmen. Ändert sich innerhalb von 10 min die Dichte der Dispersion nicht mehr, so wird der letzte Wert als ρ_E notiert. In der Regel sind die Anfangs- und Endwerte der Dichtebestimmung gleich. Sollte die Probe luftfrei erscheinen, die Dichte (ρ_E) sich aber von der anfänglich bestimmten Grunddichte (ρ_0) unterscheiden, so muss die Auswertung mit (ρ_E) durchgeführt werden, da entweder Bestandteile aus der Probe entweichen oder sich Luftblasen am Senkkörper angelagert haben.

Da bei HFAE¹, HFAS² und HFC³ nach ISO 6743-4:1982 in den meisten Fällen mit einer Änderung der Dichte durch eine Produktveränderung zu rechnen ist, wird generell die Dichte (ρ_E) zur Bestimmung des Luftabscheidevermögens (LAV) eingesetzt. Aus

¹Öl in Wasser Emulsionen

²In Wasser gelöste synthetische Konzentrate

³Wasserglykole

Tabelle 2.1: Zeitspanne zwischen zwei Dichtebestimmungen

Zeitspanne seit Unterbrechung der Luftzufuhr	Zeitspanne zwischen zwei Dichtebestimmungen
bis 10 min	1 min
ab 10 min	2 min

den Proben können, beim Belüften unter anderem flüchtige Bestandteile wie Wasser, Lösungsmittel oder andere Wirkstoffe austreten. Es zeigt sich dann ein Verhalten, das nicht dem praktischen Einsatz entspricht.

3. Auswertung der Dichte und LAV–Berechnung

Für die Auswertung wird der Anteil dispergierter Luft (L) als prozentualer Volumenanteil $\phi(L)$ nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\phi(L) = \frac{\rho_0 - \rho_x}{\rho_0 - \rho_L} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

Die gemessenen Dichten sind mit ρ_x angegeben, die Dichte der eingebrachten Luft bei Prüftemperatur mit ρ_L . In vielen Fällen ist der Einfluss der Luft vernachlässigbar klein, so dass sich der vereinfachte Zusammenhang zum LAV ergibt:

$$\phi(L) = \frac{\rho_0 - \rho_x}{\rho_0} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

Die Zerfallsdauer wird grafisch aus dem Diagramm des Volumenanteils ermittelt. Dazu wird der Anteil der dispergierten Luft über der Zeit nach Abstellen der Luftzufuhr aufgetragen, bis der Luftgehalt nur noch 0,2 Vol.-% Volumenanteil beträgt. Die Angabe erfolgt dann als „LAV DIN 51382–50–14 min“ für eine Messung bei 50 °C in einer Zeitspanne von 14 min und keinem gemessenen Dichteunterschied. Sollte eine Dichteänderung eingetreten sein, so muss diese auch vermerkt werden.

2.4 Flender–Schaumtest

Die Firma Flender verwendet seit 1980 eine Eigenentwicklung zur Untersuchung des Schaumverhaltens von Getriebeölen, da sich die statischen Methoden aus der ASTM D 892 [AST02] und DIN 51566 [DIN83] nicht direkt mit den beobachteten Schäumungsverhalten im realen

Getriebe vergleichen lassen. Daher werden annähernd reale Verhältnisse durch ein Zahnradpaar nachgebildet, das auf zwei Wellen mittig befestigt ist. Durch die Rotation in einem geschlossenen Getriebegehäuse vermischt sich die Ölprobe mit Luft und sorgt so für die Schaumbildung. Mit diesem Verfahren lässt sich nicht nur das Verhalten von reinen Ölen, sondern auch die Beeinflussung durch die Beimischung weiterer Stoffe bestimmen, da sich die Luftaufnahme- und Luftabscheidefähigkeit, die Öl-Luft-Dispersionen und der Oberflächenschaum entsprechend den Zusatzstoffen ausbilden. Dieses Verfahren wird mittlerweile von verschiedenen Ölherstellern und Prüflaboren bei Getriebeölen angewendet. Der Prüfablauf erfolgt automatisiert, die Auswertung wird anschließend manuell durch Fachpersonal durchgeführt. Folgende Geräte werden für die Durchführung benötigt:

- Getriebegehäuse
Mit 1 l Fassungsvermögen und Aufnahmen der beiden Zahnräder, so dass die Zahnräder bis zur Hälfte in die Probe eintauchen
- Zahnradpaar
- Motor
- Heizung
150 W, zur Abdeckung der Temperaturbereiche von 0 °C bis 50 °C
- Thermometer

1. Vorbereitung

Ein Liter des Öls wird in das gereinigte Gehäuse der Prüfeinrichtung gefüllt, die Nulllinie markiert und auf 25 °C ($\pm 0,5$ °C) temperiert. Reste aus vorangegangenen Messungen verfälschen wie schon bei den anderen Verfahren das Ergebnis. In der Praxis hat es sich bewährt, das Öl um 3 °C höher zu temperieren und auf die Prüftemperatur abkühlen zu lassen. Sobald das Öl die erforderliche Temperatur erreicht hat, wird der Füllstand an der Glasöffnung kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert.

2. Durchführung

Der eigentliche Test beginnt mit dem Verschäumen des Öls durch die Zahnräder für 300 s (± 3 s). Nach dem Abschalten des Antriebs wird die Volumenvergrößerung bestimmt, wobei zwischen dem Oberflächenschaum und der Luft-Öl-Dispersion unterschieden werden muss. Bei hochviskosen Ölen, die an der Wandung herunterlaufen, kann die erste Messung keine zufrieden stellenden Messergebnisse liefern, so dass eine zweite Messung 1 min später durchgeführt werden muss. Erst nach dieser Minute ist eine deutliche Unterscheidung zwischen Oberflächenschaum und Luft-Öl-Dispersion

Tabelle 2.2: Schaumverhalten von Ölen

Luftgehalt		Schaumverhalten
bis	5 Vol.-%	gut
bis	10 Vol.-%	befriedigend
bis	15 Vol.-%	noch zulässig
über	15 Vol.-%	unzulässig

möglich. Die Schaumentwicklung sowie die Öltemperatur werden über einen 90 minütigen Zeitraum protokolliert. Sobald keine geschlossene Oberfläche vorhanden ist, d.h. der Schaum aufreißt oder sich Inseln bilden, wird Oberflächenschaumvolumen mit 1 Vol.-% angenommen und die Messung beendet.

3. Auswertung

Die Auswertung erfolgt grafisch an Hand der beiden Kurven der Luft-Öl-Dispersion und des Oberflächenschaums über der Stillstandszeit. Der Einfluss der Temperatur wird als sehr gering angegeben und kann somit vernachlässigt werden. Mit vier Merkmalen lässt sich das Schaumverhalten charakterisieren.

- a) Die Volumenzunahme eine Minute nach Abschalten des Motors
- b) Die Schaumzerfallszeit bis zu einem Restbetrag von weniger als 1 Vol.-%
- c) Der Volumenanteil des Oberflächenschaums und die Volumenvergrößerung der Luft-Öl-Dispersion nach 1 min
- d) Falls sich der Schaum nicht innerhalb der 90 minütigen Messzeit abbaut, werden die verbliebenen Restvolumina angegeben.

Die Firma Flender wendet in der Praxis das Kriterium 3a mit der Messung eine Minute nach Abschalten des Motors zur Beurteilung des Schaumverhaltens von Ölen an. Dazu werden die Luft-Öl-Dispersion mit dem Oberflächenschaum gemeinsam in vier Kategorien unterteilt.

Da die Tragfähigkeit der Verzahnung durch stark schäumende Öle negativ beeinflusst wird und der Schaumzerfall sehr lange dauert, rät die Firma Flender vom Einsatz der Öle mit einer Volumenzunahme von mehr als 15 Vol.-% ab.

2.5 Prüfung nach ISO 9120

Die ISO 9120 (Impinger-Verfahren) bestimmt das Luftabscheidevermögen von Dampfturbinen- und anderen Ölen. Sie weist Parallelen zur DIN 51381 [DIN88] auf, da sie u.a. die gleichen Glasgeräte vorschreibt. Bezüglich der zu verwendenden Temperaturen ist die ISO 9120 präziser, da sie die Öle in drei Viskositätsbereiche (bei 40 °C) unterteilt und daraufhin prüft.

Tabelle 2.3: Temperaturen beim Impingerverfahren

Viskosität	Temperatur
unter 9 mm ² /s	25 °C
von 9 mm ² /s bis 90 mm ² /s	50 °C
über 90 mm ² /s	75 °C

Die für die jeweilige Viskosität zu verwendende Temperatur kann Tabelle 2.3 entnommen werden, sie wird während des gesamten Verfahrens konstant gehalten. Für das Verfahren werden folgende Geräte benötigt:

- Filter
Zur Reinigung der Druckluft von Partikeln und Öl
- Heizeinrichtung
Zum Erwärmen der Druckluft auf die Öltemperatur ($\pm 0,2$ °C)
- Druckmessgerät
Mit einem Messbereich von 0 kPa bis 35 kPa
- Temperaturfühler
Von 0 °C bis 100 °C mit einer Auflösung von 0,1 °C

- Prüfgefäß

Das Gefäß besteht aus dem eigentlichen Probengefäß mit Lufteinlassstutzen und Prellplatte, sowie einem Heizgefäß mit Anschlüssen für den Umlaufthermostat.

- Umlaufthermostat

Der Thermostat sollte eine Kapazität von 10 l und einen Heizbereich bis 100 °C ($\pm 0,1$ °C) aufweisen. Zum Temperieren des Öls sollte die Heizflüssigkeit mit 10 l/min durch die Anordnung gefördert werden.

- Wärmeschrank

- 250 ml–Messzylinder
- Hydrostatische Waage

Zur Dichtebestimmung wird ein Senkkörper mit 80 mm Länge ($\pm 1,5$ mm) und einer Verdrängung von 5 ml oder 10 ml verwendet. Die Waage soll eine Genauigkeit von 0,5 g/l ($= 0,5 \text{ kg/m}^3$) aufweisen.

- Stoppuhr

Durchführung

Zuerst werden 200 ml Ölprobe und der Senkkörper der hydrostatischen Dichtewaage auf Prüftemperatur erhitzt. Anschließend werden 180 ml in ein Prüfgefäß überführt und die Dichte des Öls bestimmt. Dazu wird der Senkkörper bis auf 10 mm (± 2 mm) über den Messzylinderboden abgesenkt. Danach wird der Senkkörper entfernt, gereinigt und für spätere Anwendungen temperiert, anschließend wird der Lufteinlassstutzen eingesetzt. Nach 300 s wird dann für 420 s (± 1 Sekunde) unter konstantem Druck von 20 kPa die Luft in die Probe eingebracht. Nach Ablauf dieser Zeit wird die Luftzufuhr gestoppt und der Lufteinlassstutzen zügig durch den Senkkörper ersetzt. Die Dichtewaage ist dabei auf einen Wert eingestellt, der 0,2 Vol.-% Luft in der Probe entspricht. Die Zeit zwischen dem Stoppen der Luftzufuhr und dem Erreichen der Nulleinstellung der Waage ist der Luftabscheidungswert, sofern dieser Wert kleiner als 30 min ist. Zusätzlich kann auch die Luftabscheidungs-/Zeit-Kurve ermittelt werden, indem während dieser Zeit die Dichte notiert wird. Innerhalb der ersten 15 min wird die Dichte im Minutenabstand bestimmt, danach im zweiminütigen Abstand. Die Prüfung wird bei einer Abweichung von kleiner $0,5 \text{ kg/m}^3$ zweier aufeinander folgender Messwerte beendet. Der Volumenanteil der dispergierten Luft berechnet sich dann zu:

$$\phi(L) = \frac{\rho_0 - \rho_x}{\rho_0 - \rho_t} \cdot 100 \% \quad (2.3)$$

Mit:

- ρ_0 Dichte der luftfreien Probe
- ρ_x Dichte der Probe nach x Minuten
- ρ_t Dichte der Luft bei Prüftemperatur

Bestimmte Öle, zum Beispiel HFAC, HFAS⁴ und HFC-Flüssigkeiten⁵ nach ISO 6743-4 können während des Prozesses leichte Bestandteile verlieren, wodurch sich die effektive Dichte

⁴In Wasser gelöste synthetische Konzentrate

⁵Wasserglykole

ändert. Sollte dieses der Fall sein, so kann die Dichte nach 10 min bestimmt und zur Berechnung des LAV genutzt werden, oder es wird statt dessen die Enddichte herangezogen, wobei beides bei der Angabe des Ergebnisses vermerkt werden muss. Sollte zu viel Öl verloren gegangen sein und der Senkkörper freiliegen, so ist die Messung mit 190 ml zu wiederholen.

2.6 Schaumtestverfahren für Automatikgetriebe

Das Verfahren nach der ASTM D 892, die für Schmier- und Motorenöle entwickelt wurde, bestimmt das LAV von Ölen durch Einbringen der Luft in einen porösen Stein. Da sich die Ergebnisse häufig nicht auf die Automatikgetriebe übertragen lassen, ist ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des LAV von Ölen speziell für Getriebeöle (ATF) entwickelt worden [Tak02].

Dazu wurde im ersten Ansatz ein Getriebe mit Sichtfenster und Schaumsäulenanzeige ausgestattet und folgende drei verschiedene Öle bei sieben verschiedenen Temperaturen aufgeschäumt und mit dem ASTM D 6082 verglichen.

1. neues Öl mit bestem Antischaumverhalten
2. gebrauchtes schäumendes Öl mit Antischaumzusätzen
3. neues Öl ohne Antischaumzusätzen

Dabei stellte sich heraus, dass bei steigender Temperatur die Schaumentwicklung zunimmt.

Im Automatikgetriebe wird das Öl in einem geschlossenen Kreislauf gepumpt. Das Aufschäumen geschieht durch das Einspritzen mit einer Düse und die rotierenden Getriebekomponenten. Daraus ergibt sich ein feiner Schaum mit kleiner Luftblasenstruktur, zusätzlich wird dieser Schaum wieder eingesaugt und erneut eingespritzt. Daher muss ein Verfahren entwickelt werden, das die realen Bedingungen in einem Automatikgetriebe nachbildet und so das LAV von Getriebeölen beschreibt. Zusätzlich sollen dadurch Langzeit- und Praxistests von Ölen, die bei den Getriebeölen noch häufig verwendet werden, ersetzt werden, da sie im Vergleich zum Labortest sehr zeitintensiv und teuer sind.

1. Geräte
 - Einspritzdüse
Durchmesser 1 mm
 - Ölpumpe
1,42 l/min

- 1 l-Messzylinder
Durchmesser 75 mm
- Temperierung
Mittels Heizbad und Umwälzpumpe
- Mess- und Steuerungs-PC
- CCD-Kamera

2. Versuchsdurchführung

Die Ölprobe (500 ml) wird wie im Automatikgetriebe vertikal von der Pumpe angesaugt und bis zum Erreichen der Prüftemperatur im Kreis gefördert. Danach wird das Öl für 30 s durch die Düse in den Messzylinder gespritzt und dann die Ölförderung abgeschaltet. Fünf Sekunden später wird mit der Aufzeichnung des Schaumzerfalls begonnen. Dazu wird mit der CCD-Kamera alle halbe Sekunde ein Bild aufgenommen. Durch den hohen Grad der Automatisierung kann eine Messung innerhalb von 60 min abgeschlossen werden. Die Messungen werden in 20 °C Schritten zwischen 20 °C und 160 °C durchgeführt. Dieser Versuchsaufbau wurde 1998 zum Patent angemeldet und ist einigen Automobilherstellern vorgestellt worden.

2.7 Vergleich der vorgestellten Verfahren

Alle hier vorgestellten Verfahren versuchen das Luftabscheideverhalten von Öl im Laborversuch realitätsnah zu bestimmen, um das Verhalten des Öls praxisrelevant zu bewerten. Die hier vorgestellten Normen untersuchen das Luftabscheideverhalten durch Einbringen der Luft durch einen porösen Stein. Die Firma Flender und auch die Idemitsu Kosan Co., Ltd. versuchen hingegen die realen Bedingungen im Labor nachzubilden, um verlässlichere Ergebnisse zu erhalten. Zur Vorhersage des Schaumverhaltens kommen zusätzlich noch die wirtschaftlichen Aspekte hinzu, da die Analysen und die praktischen Erprobungen der Öle erhebliche Kosten verursachen.

In der Tabelle 2.4 sind die direkten Messgrößen, der Aufwand der einzelnen Messungen und der Automatisierungsgrad gegeneinander aufgetragen. Bis auf das zuletzt genannte Verfahren werden die Messwerte alle manuell aufgenommen. Wünschenswert ist die automatisierte Aufzeichnung und Auswertung, da so der genaue Zeitpunkt bestimmt werden kann, an dem sich die Schaumsäule vollständig auflöst, und Messfehler vermieden werden können.

Tabelle 2.4: Vergleich der Verfahren

	Aufwand	Automatisierungsgrad		Messgröße
		Ablauf	Erfassung	
DIN 51566	gering	gering	manuell	Höhe, Zeit
ASTM D 892	mittel	gering	manuell	Luftmenge, Höhe, Zeit
DIN 51381	hoch	gering	manuell	Dichte, Zeit
Flender-Test	gering	mittel	manuell	Höhe, Zeit
ISO 9120	hoch	hoch	manuell	Dicht, Zeit
Schaumtestverfahren für Automatikgetriebe	gering	hoch	automatisch	Höhe, Zeit

Die vorgestellten Prüfverfahren erläutern detailliert Versuchsaufbau und –durchführung. Lediglich die Firma Flender spricht eine Empfehlung für oder gegen die Verwendung des geprüften Öls aus.

2.8 Motivation

Um Bewertungsmaßstäbe für verschiedene Öle im Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen zu erhalten, wird der Anwendungsfall praxisnah im Labor nachgebildet. Dazu ist in einer Kooperation des Institutes für Regelungstechnik mit dem Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik sowie dem Institut für Produktionsmesstechnik ein Laborgerät zur Bestimmung des Luftabscheidevermögens von Ölen entwickelt und konstruiert worden.

Für die Auswertung des Luftabscheidevermögens muss ein homogener Schaum erzeugt werden, damit sich eine den Vorgaben entsprechende Schaumsäule ausbildet. Sowohl die Schaumentwicklung als auch der –zerfall werden von einem Kamerasystem aufgezeichnet. Aus den aufgenommenen Bildern wird die Schaumhöhe berechnet und steht im Anschluss der Messung der Auswertung zur Verfügung. Damit die abschließende Auswertung des Schäumungsverhaltens sowie des Luftabscheidevermögens von Ölen reproduzierbar durchgeführt und somit eine Beurteilung des Öls vorgenommen werden kann, erfolgt der Ablauf automatisiert.

Anders als bei den zuvor genannten Verfahren ist zum einen der Luftanteil des Luft–Öl–Gemisches während einer Beanspruchungsphase konstant. Er wird über einen definierten Zeitraum auf einen durch die Auswertung [Lei07] vorgegebenen Wert von 5 Vol.-% geregelt. Zum anderen ist dieser Ansatz insofern innovativ, dass zusätzlich der vollständige Ablauf, das Vorbereiten des Öls, das Aufschäumen der Probe, die Messaufnahme des Schaumzerfalls

und die abschließende Auswertung des Schäumungsverhaltens sowie des Luftabscheidevermögens automatisiert erfolgen. So können Fehler durch manuelle Auswertung vermieden und Reproduzierbarkeit gewährleistet werden.

3 Laborgerät zur Bestimmung des Luftabscheidevermögens

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist für die Verschäumung von Hydraulikölen der Prototyp eines Laborgerätes der Volkswagen AG Wolfsburg [Ber05] modifiziert worden, um die Rahmenbedingungen der Tests denen der mobilen Arbeitsmaschine nachzuempfinden. Weiterhin wird der Luftgehalt im Öl auf einen genau spezifizierten Wert eingestellt und für die Prüfdauer konstant gehalten.

Zunächst wird im folgenden Abschnitt 3.1 auf die Besonderheiten und den hohen Automatisierungsgrad des neuen Laborgerätes eingegangen und im Anschluss wird der Hydraulikkreis genauer betrachtet. Die Regelung des Luftgehaltes ist im Falle des Einbringens mit Hilfe eines linearen Drosselventils auf einem PC und im Falle des Einbringens mit einer Einspritzdüse auf einem DSP realisiert. Auf die Modellbildung und Regelung wird im Abschnitt 3.2 eingegangen. Daraus wird eine Fragestellung entwickelt und es werden Lösungsansätze entworfen.

3.1 Konzeption des automatisierten Prüfstandes

Das Laborgerät ist als geschlossener Prüfschrank entwickelt worden, der sich in die Anlagenteile der Hydraulik, der Temperierung und der Steuerung unterteilen lässt. Durch die Abkapselung der Anlagenteile sowohl voneinander, als auch von der Umgebung, wird die Sicherheit erhöht. So wird unter anderem die Gefährdung des Bedienpersonals durch die rotierende Welle oder heißes Öl vermieden. Entstehende Öldämpfe werden durch ein Entlüftungssystem gezielt entsorgt.

Zusammengefasst lassen sich die Vorteile der Anlage wie folgt angeben:

- Hoher Automatisierungsgrad des Prüfablaufs
- Hohe Komplexität der Anlagensteuerung

- Hohe Sicherheit des Bedienpersonals
- Geringe Fehlerquote des Prüfablaufs durch Bedienfehler

Kernstück der Anlagensteuerung ist die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit verschiedenen analogen und digitalen Ein- und Ausgangsmodulen sowie der Ablaufsteuerung. Alle sicherheitsrelevanten Messgrößen laufen hier zusammen und gewährleisten so einen sicheren Betrieb. Das Temperiergerät für den Ölkreislauf, die Luftgehaltserfassung und der Mess- und Analyserechner stellen über die RS-232-Schnittstelle alle benötigten Daten zur Verfügung. Die sicherheitsrelevante Kommunikation mit dem Bediener erfolgt über Taster und Leuchtmelder, komplexere Einstellungen können auf einem PC mit Microsoft Windows über Tastatur und Maus eingegeben werden.

3.1.1 Aufbau des Hydraulikkreislaufs

Für die Bestimmung des Schäumungs- und Luftabscheidevermögens von Hydraulikölen ist die realitätsbezogene Schaumerzeugung besonders wichtig. Der Aufbau des Ölkreislaufs ist in Bild 3.1 dargestellt. Mit diesem System wird zum einen das Öl temperiert, und zum anderen der Schaum erzeugt. Für das Temperieren befinden sich zwei Wärmetauscher am Ölkreislauf, einer direkt im Rücklauf (12) und der andere am Behälter (9). Das Wärmeaggregat (13) ist sicherheitshalber räumlich vom Hydraulikkreis getrennt.

Eine Pumpe (1) am tiefsten Punkt des Kreislaufs fördert mit 6 l/min das Öl. Mit dem Drosselventil (3) wird der Druck des Öls manuell eingestellt. Durch das Luftgehaltsmessgerät (5) wird das Öl in einen speziellen Behälter (9) mit Prellplatte geleitet und gelangt von dort durch den Wärmetauscher wieder zur Pumpe. Über die Messstelle (2) wird der Öldruck bestimmt, mit einem PT100 am Behälter (10) die Öltemperatur. Durch das Druckbegrenzungsventil (19) wird das Öl bei Überdruck gezielt abgelassen. Mit dem Kugelhahn (18) wird das Öl aus dem System entnommen. Die beiden Schaltventile (4) und (11) werden bei der Schaumzerfallsmessung nicht angesteuert. Der Hydraulikkreislauf ist somit unterbrochen und es können keine weiteren Luftblasen in den Behälter aufsteigen und die Messung negativ beeinflussen.

Die Luft wird im Prüflauf mittels einer Lineardrossel (17) durch den entstandenen Unterdruck des Öls eingebracht. Der entstehende Unterdruck (15) und die eingebrachte Luftmasse (16) werden dabei aufgezeichnet. Damit kein Öl in die sensible Sensorik gelangt, wird der Luftzweig durch ein Rückschlagventil (14) geschützt.

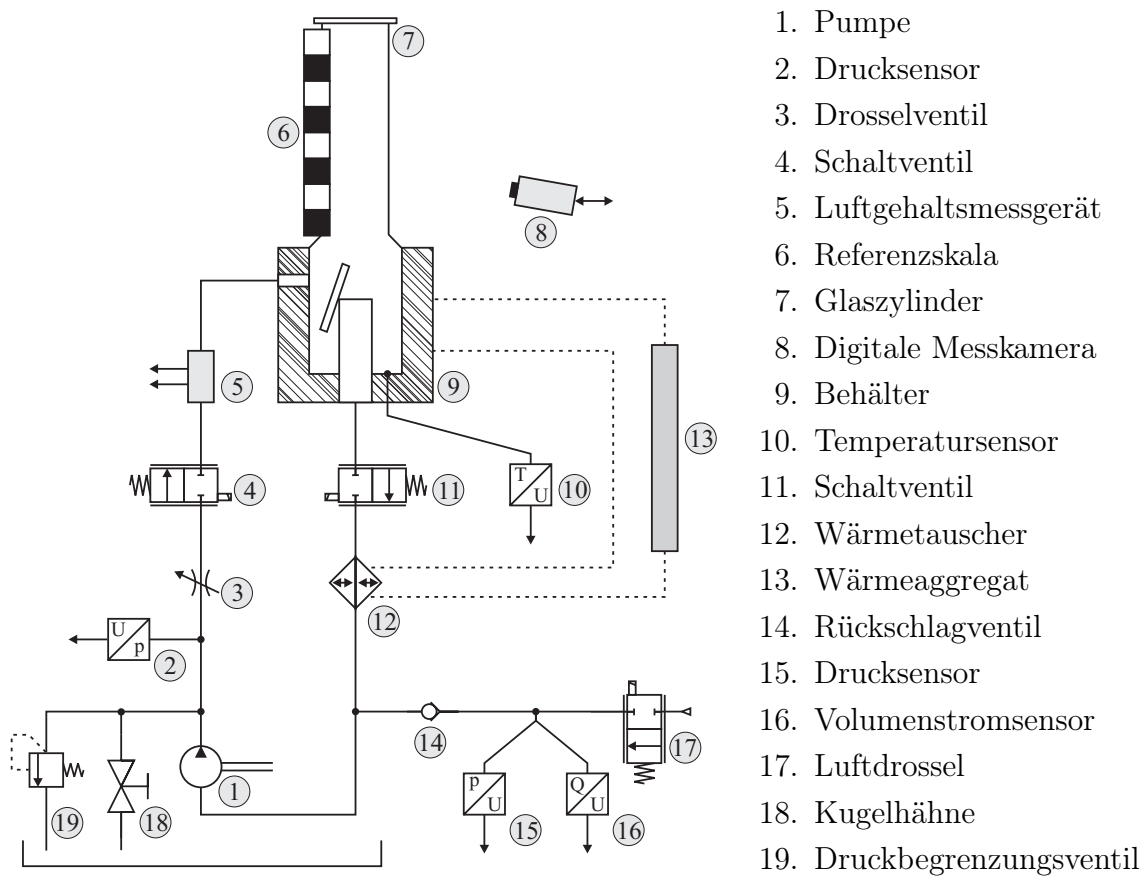


Bild 3.1: Hydraulikschaltplan der Prüfvorrichtung

Der Schaum entsteht durch schlagartige Entspannung am Drosselventil bei hoher Druckdifferenz des Luft-Öl-Gemisches. Der Luftgehalt des Öls wird dann mit dem Luftgehaltsmessgerät (5) bestimmt. Die Auswertung der Schaumsäule erfolgt mit der digitalen Messkamera (8) mit integriertem PC. Dazu sind am Behälter (9) ein Glaszylinder (7) und eine Referenzskala (6) angebracht. Die Kamera nimmt in äquidistanten Abständen Bilder auf und berechnet die Schaumhöhe zwischen der Luft- und Öldispersion. Die Auswertung des Kamera-PCs [Tut04] wird anschließend an den Messrechner übermittelt.

3.1.2 Architektur der Prozessrechner

Der Automatisierungsgrad der Prüfanlage ist sehr hoch. Die verwendeten Komponenten sind entweder mit einem Mikrocontroller oder einem vollständigen PC ausgestattet, die die lokalen Aufgaben bearbeiten. Alle Systemteile tauschen für den Ablauf die Daten untereinander aus, für die Auswertung des Schaumzerfalls werden sämtliche Daten auf dem Messrechner zusammengeführt. Folgende Komponenten sind in der Anlage verbaut:

- Siemens SPS S7-300
- CGS-Messgerät
Messsystem zur Bestimmung des Gasgehalts von Flüssigkeiten
- Temperiergerät
- Kamera mit integriertem PC
- Frequenzumrichter und Motor

Kernstück der Ablaufsteuerung mit den unterschiedlichen Programmblöcken ist die SPS. Sie führt die Eingaben des Benutzers aus und gibt den Status durch Leuchtmelder aus. Um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten, wird die grundlegende Steuerung nicht mit einem PC durchgeführt. Die Ansteuerung der Schaltventile und des Motors (4) sowie die Bereitstellung der Versorgungsenergie wird ausschließlich von der SPS durchgeführt. In Bild 3.2 ist die Kommunikationsanbindung der Komponenten dargestellt.

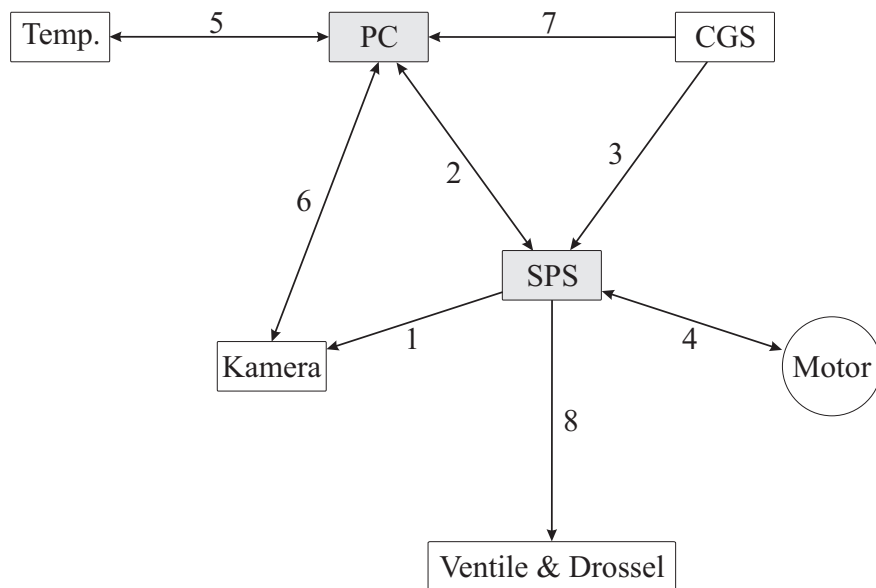


Bild 3.2: Systemtopologie

In Abhängigkeit von der Datenrate und der Priorität des Signals werden unterschiedliche Busse und Protokolle eingesetzt. Durch eine digitale Kopplung (1) steuert die SPS die Kamera und liefert die Triggerimpulse für die Aufnahmen. Die Prozessdaten empfängt sie durch eine Master-Slave-Anforderung per RS-232-Verbindung (2) vom Mess-PC, und übermittelt ihrerseits alle gesammelten Prozessgrößen wie zum Beispiel Motordrehzahl, Statusangaben und aktuelle Prüfdauer. Sowohl die SPS als auch der Messrechner erhalten den aktuellen

Luftgehalt als analoge Größe (3) und (7). Die Luftgehaltsregelung erfolgt auf dem PC mit dem Programm DASyLab [mea].

Die Luftgehaltserfassung wird nicht angesteuert. Sie läuft durch Zuschalten der Versorgungsspannung und gibt den Luftgehalt kontinuierlich aus. Für die Versuchsdurchführung ist eine konstante Öltemperatur erforderlich, die über das Bedienprogramm am PC eingestellt und vom Temperiergerät eigenständig geregelt wird. Die Ansteuerung erfolgt über eine RS-232-Verbindung (5). Ist der Messzyklus beendet, werden die aufgenommenen Daten des Schaumzerfalls von der Kamera zum Messrechner übertragen. Um die Übertragungsdauer gering zu halten, wird dabei eine TCP/IP-Verbindung (6) benutzt. Im folgenden Abschnitt werden die Programme der SPS und des PCs vorgestellt. Auf dem PC sind die Datenerfassung und die Regelung mit einem blockorientierten Messprogramm realisiert. Als vorteilhaft erwiesen haben sich die große Bibliothek und die einfache Parametrierung, als nachteilhaft für die Regelung und Signalaufbereitung die feste Struktur. So können unter anderem keine eigenen Regler oder spezielle Filter programmiert werden und die Nachführung der Reglerparameter ist während eines Durchlaufs auch nicht ohne weiteres möglich.

Da die Daten über verschiedene Schnittstellen eingelesen werden, weisen sie unterschiedliche Systemzeiten auf, die für die Bearbeitung synchronisiert werden müssen. Durch die Anpassungsblöcke werden die Zeitstempel synchronisiert, was die Laufzeit des Programms erhöht. Ferner können sich schreibende und lesende Zugriffe durch das Synchronisieren gegenseitig blockieren, was ein sofortiges Beenden des Programms verursacht. Die Messdatenaufzeichnung und Bearbeitung der Anwendereingaben werden im 1 kHz-Takt bearbeitet.

Der einmalige Durchlauf des SPS-Programms, inklusive der RS-232-Kommunikation und der Datenerfassung, darf nach Herstellerangaben maximal 250 ms dauern. Die maximale Zykluszeit wird vor dem Übertragen auf die SPS kontrolliert. Kann diese nicht gewährleistet werden, wird der Datentransfer nicht zugelassen. Die Ablaufsteuerung ist in Bild 3.3 abgebildet.

Bei Programmstart wird ein Zyklus begonnen, der die Kommunikation, Drucküberwachung und Ein-/Ausgabemodule bearbeitet. Der Anwender kann zwischen drei Unterprogrammen auswählen. Zwei davon dienen der Vorbereitung des Öls und eines steuert den Prüfablauf. Wird ein Unterprogramm gestartet, so wird die gleichzeitige Ausführung eines anderen Unterprogramms verhindert. Erst nach einem manuellen Programmstopp oder nach Ablauf der Zeit kann eine erneute Auswahl getroffen werden. Eine Fehlbedienung durch versehentliches Umschalten von einem zum anderen Unterprogramm ist dadurch ausgeschlossen.

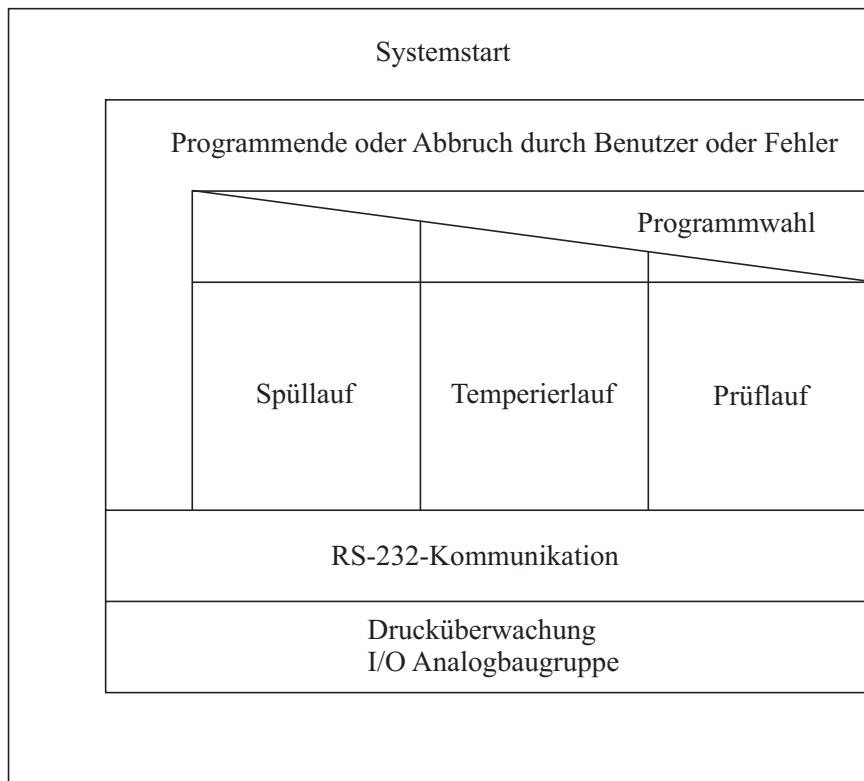


Bild 3.3: Ablaufsteuerung der Anlage

Für die Durchführung einer Messung werden die folgenden Unterprogramme der Reihe nach ausgeführt.

1. Temperierlauf
2. Spüllauf
3. Prüflauf

Zuerst wird die Probe durch den Temperierlauf bei einer Drehzahl von 250 l/min auf die Prüftemperatur erhitzt. Dabei kann die Luft, die durch das Einfüllen in die Anlage ins Öl gelangt ist, austreten und sich in den Biegungen und Toträumen sammeln. Damit beim Prüflauf keine Luftblasen aus den Toträumen mitgerissen werden und die Messung unbrauchbar wird, wird durch den Spüllauf bei 250 l/min in Förderrichtung und bei 1000 l/min gegen die Förderrichtung der Pumpe die Luft ausgespült. Einzelne Luftblasen steigen während dieses Prozesses auf. Nachdem das Öl durch den Temperierlauf und den Spüllauf vorbereitet ist, wird es durch den Prüflauf aufgeschäumt. Dafür wird das 50 °C heiße Öl bei 750 l/min für die eingestellte Prüfzeit unter Druck gesetzt und mit Luft angereichert. Die getrocknete ölfreie Luft wird durch den Unterdruck des Öls durch die Luftdrossel eingebracht. Am Drosselventil entsteht durch die schlagartige Entspannung der Schaum, da die gelöste Luft

aus dem Öl austritt. Der Luftgehalt wird bestimmt und die Luftdrosselstellung verändert, die Regelung dazu wird in Abschnitt 3.2 behandelt. Der Schaum gelangt ins Gefäß, ein Teil davon bildet im Glaszylinder die Schaumsäule, der Rest wird durch die Rückleitung der Pumpe zugeführt. Nach Ablauf der eingestellten Prüfzeit wird die Pumpe gestoppt und die Schaltventile werden geöffnet. Der Schaumaufbau und -abbau wird durch die Kamera mit einem Bild pro Sekunde aufgezeichnet und muss nach der eingestellten Messzeit vom Benutzer zusammengeführt und gespeichert werden.

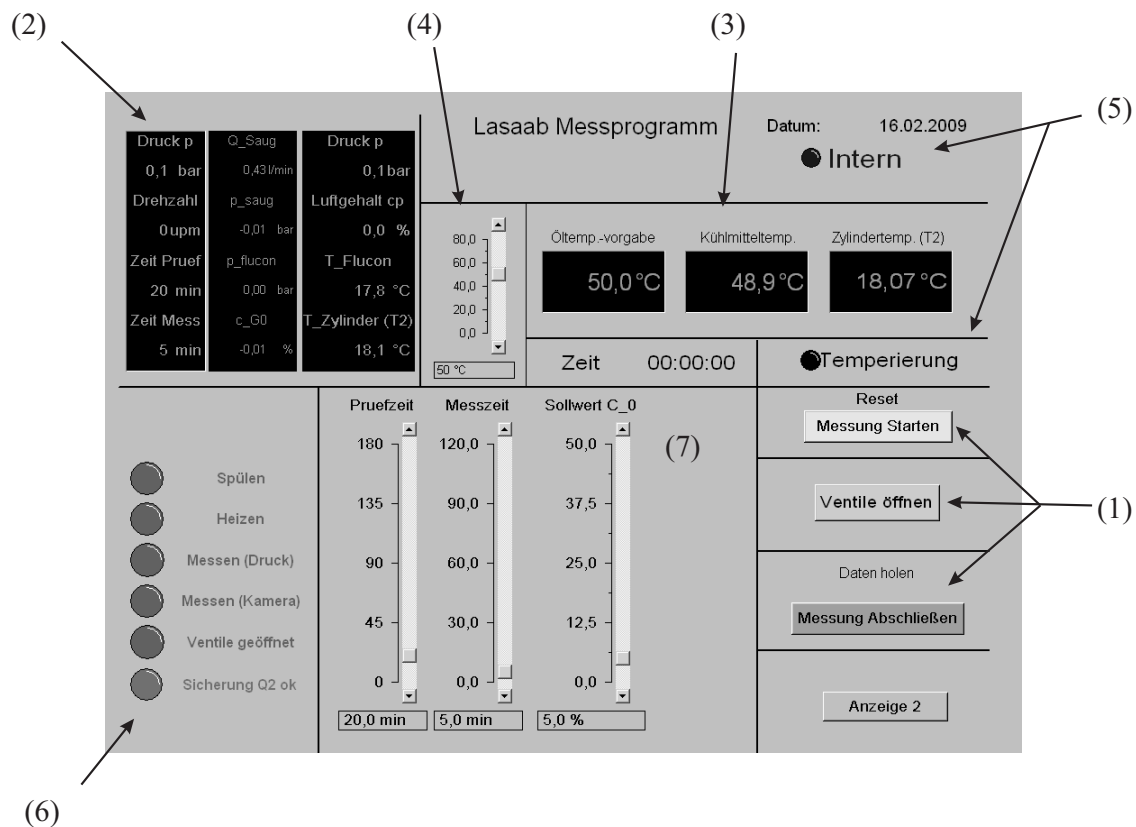


Bild 3.4: Bedienoberfläche unter DASyLab

Dafür stehen auf der ersten Seite der Bedienoberfläche (Bild 3.4) entsprechende Bedienfelder (1) zur Verfügung. Hier können zu den Leuchtmeldern des Schrankes weiterführende Anlageninformationen der SPS (2) und des Temperiergerätes (3) abgefragt und verändert werden (4). Einige Funktionen können parallel zu den Tastern auch über die Software angesteuert werden, um eine benutzerfreundliche Handhabung zu gewährleisten. Das Temperiergerät kann sowohl auf die Temperatur des Heizbades (intern), als auch auf einen Messfühler (extern) regeln, zur Kontrolle des Messpunktes und ob die Temperatur die Vorgabe erreicht hat, wird durch die Meldungen (5) und (7) angezeigt. Eine Rückmeldung darüber, welches Unterprogramm läuft, und ob die Sicherung (6) ausgelöst hat, wird auf der linken Bild-

schirmseite ausgegeben. Auf der zweite Seite, die über die Schaltfläche „Anzeige 2“ erreicht werden kann, werden Prozessdaten wie die zeitlichen Verläufe von Luftgehalt, Druck und Temperatur online dargestellt.

3.2 Modellbildung und Regelung

Für die Bestimmung des Luftabscheidevermögens (LAV) von Ölen sind unter anderem die Schaumhöhe und Zerfallsdauer [Lei07] entscheidend. Durch die eingebrachte Luft baut sich eine Schaumsäule auf, die je nach Öl eine bestimmte maximale Höhe h erreicht. Dabei ist ein gleichmäßiger Schaumaufbau mit konstantem Endwert der Schaumhöhe gefordert.

Das Gefäß ist zu Beginn der Messung gereinigt, so dass sich der Schaum gut an der Oberfläche anlagern kann. Sollte kurzzeitig zu viel Luft eingebracht werden, nimmt die Höhe der Schaumsäule vorübergehend zu. Die nun benetzte Oberfläche erschwert einen erneuten Schaumaufbau.

Zur Bestimmung des Luftabscheideverhaltens müssen die Messungen unter denselben Bedingungen reproduzierbare Ergebnisse liefern. Ein Überspringen des Luftgehaltes führt in den meisten Fällen jedoch zu einer zeitlich begrenzten höheren Schaumsäule, so dass Messungen der Höhe voneinander abweichen. Dieses ist zu vermeiden.

Ferner besteht eine Besonderheit dieser Anordnung darin, dass zwar Luft in das Öl eingebracht werden kann, es jedoch keine Möglichkeit gibt, die Luft aktiv aus dem Öl zu extrahieren. Das Blockschaltbild des Laborgerätes ist in Bild (3.5) dargestellt.

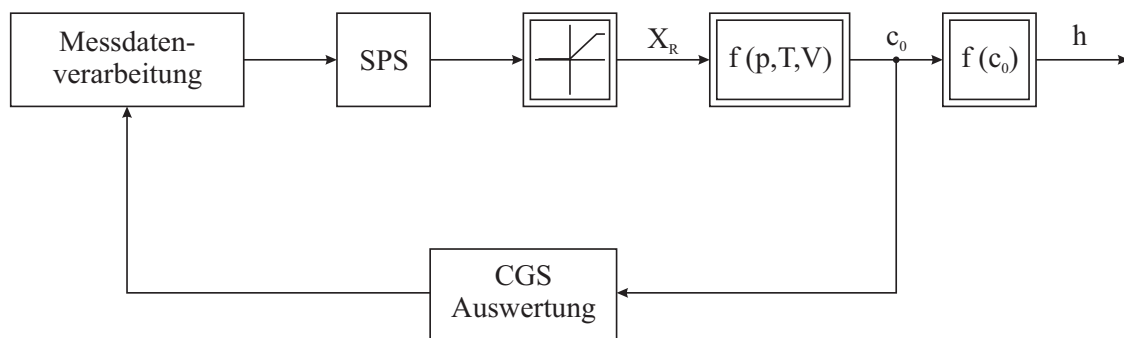


Bild 3.5: Blockschaltbild mit SPS und linearem Drosselventil

Die Schaumhöhe h ist während einer Verschäumung des Öls für die Regelung nicht verfügbar. Daher muss für die Vergleichbarkeit der Öle der Schaumaufbau ähnlich verlaufen, so dass sich folgende Anforderungen an die Regelung formulieren lassen:

- Stationäre Genauigkeit des Luftgehaltes c_0

Dies gewährleistet eine reproduzierbare Erzeugung der resultierenden Schaumhöhen der vermessenen Öle. Die Ergebnisse sind miteinander vergleichbar.

- Minimale Überswingweite

Eine unbeabsichtigte Benetzung der Glasinnenfläche bei der Schaumerzeugung verfälscht das Ergebnis und muss daher vermieden werden.

- Gleiche Einschwingdauer für alle Öle

Dadurch wird ein gleich langer Belastungszeitraum gewährleistet, da sich die Öleigenschaften durch die Beanspruchung, unter anderem durch Druck und Scherung, verändern können.

Um eine Messung als gut zu bewerten, müssen für die genannten Kriterien folgende Grenzwerte eingehalten werden: Der Luftgehalt erreicht innerhalb von drei Minuten die Führungsgröße. Die Schaumhöhe steigt monoton bis sie eine konstante Höhe erreicht. Die Abweichung des Luftgehaltes von der Führungsgröße beträgt maximal 0,5 Vol.-%. Es dürfen einzelne zeitlich stark begrenzte Spitzen im Luftgehalt vorkommen und die Abweichung vom Luftgehalt darf mehr als 0,5 Vol.-% betragen, damit die Messung noch akzeptabel ist. Hält die Messung nicht die genannten Grenzwerte ein, so ist sie als schlecht zu bewerten.

Aus den Anforderungen an die Regelung bezüglich des Luftgehaltes und aus dem Verlauf der Schaumhöhe lassen sich die in der folgenden Tabelle zusammengefassten Kriterien zur Beurteilung ableiten:

Tabelle 3.1: Beurteilungskriterien der Regelungen im Überblick

Beurteilung	Einschwingdauer	Überschwingen	Toleranzbereich	Schaumhöhe
gut	<180 s	kein	$\pm 0,5$ Vol.-%	konstant
ausreichend	<180 s	gering	$\pm 1,0$ Vol.-%	konstant
schlecht	>180 s	beliebig	beliebig	variiert

Diese Bewertung betrifft ausschließlich die Luftgehaltsregelung. Daran schließt eine Betrachtung des Luftabscheideverhaltens von Ölen [Lei07] mit einer Bewertung an. Im folgenden Abschnitt wird die Modellbildung der Strecke betrachtet, anschließend werden die verschiedenen Regelstrategien vorgestellt und beurteilt.

3.2.1 Modellbildung des Systems mit Lineardrossel

Bei der Modellbildung wird von der Struktur in Bild 3.5 ausgegangen. Für die Identifikation sind folgende Systemkomponenten relevant.

Der Regler ist auf dem PC zur Datenerfassung implementiert. Die Ansteuerung der linearen Luftdrossel durch einen Spannungs–Frequenz–Wandler übernimmt eine SPS. Der Luftgehalt wird von einem CGS–Messsystem bestimmt. Bei dem zum Stellen der Luft verwendeten Drosselventil wird in Abhängigkeit von der angelegten Spannung die durchströmte Querschnittsfläche linear geändert. Dazu wird die Spannung mittels eines Elektromagnetes in eine Kraft gewandelt, die den Schieber gegen eine Feder zieht. Liegt keine Spannung an, so ist die Luftdrossel geschlossen. Es erfolgt keine Rückmeldung der Größe des Öffnungsquerschnittes.

Eine vollständige mathematische Beschreibung der komplexen Vorgänge im Öl ist nicht möglich. Das Öl nimmt die eingebrachte Luft teilweise oder vollständig auf, sobald es unter Druck gesetzt wird. Die eingebrachte Luft ist dann nicht mehr messbar. Am Drosselventil wird das Öl schlagartig entspannt, die Luft tritt aus und es bildet sich der Schaum. Die Schauminhibitoren¹ verändern die Luftaufnahme und das Luftabscheideverhalten. Allgemein lässt sich der Luftgehalt c_0 des Öls formulieren wie folgt:

$$c_0 = f(p, T, V_{Luft}) \quad (3.1)$$

Temperatur T und Systemdruck p werden über die Messung konstant gehalten. Dazu wird das Öl an zwei Stellen temperiert und der Druck durch ein fest eingestelltes Öldrosselventil vorgegeben. Da der Motor mit konstanter Drehzahl betrieben wird, stellt sich ein konstanter Druck ein. Ein leichter Druckabfall durch das Einbringen der Luft lässt sich nicht ausgleichen. Vereinfacht lässt sich nun der Luftgehalt wie folgt angeben:

$$c_0 = f(V_{Luft}) \quad (3.2)$$

Zur Modellierung wird von einem für den Arbeitspunkt linearen Modell ausgegangen. Es wird nur das Einbringen der Luft ins Öl untersucht, da durch das Luftdrosselventil nur der Einlass verstellt werden kann.

Mit diesen Annahmen folgt, dass für die Identifikation der Streckenparameter eine Anregung mit verschiedenen Sprungamplituden verwendet werden kann. Bild (3.6) zeigt beispielhaft

¹Schaumhemmer

für eine Anregungsamplitude die Streckenantwort des Luftgehaltes eines Öls und den damit verbundenen Schaumaufbau.

1. Annahme eines linearen Systems

Die Totzeit zu Beginn lässt sich durch die beteiligten vernetzten Komponenten und den Aufbau des Laborgerätes erklären. Zum einen benötigen die SPS und der PC für ihre Programmbearbeitung und Kommunikation Zeit. Zum anderen dauert die Luftgehaltsbestimmung etwa eine Sekunde. Hinzu kommt die Dauer des Lufttransports im Öl vom Einspritzpunkt zur Messstelle. Der verbleibende zeitliche Anteil ist auf die Transportdauer der Luft von der Lineardrossel zum Einspritzpunkt zurückzuführen. Die Luft wird durch den entstehenden Unterdruck ins Öl gesaugt, die resultierende Zeit wird somit durch Leitungslänge und -querschnitt vorgegeben. Die Totzeit lässt sich durch die Systemkomponenten abschätzen zu:

$$T_T \approx T_{SPS} + T_{PC} + T_{Kommunikation} + T_{Messung} + T_{Transport}$$

2. Modellierung

Bei der Modellbildung stehen verschiedene Modelle zur Auswahl, dabei muss in jedem Fall die Totzeit des Systems ins Modell einfließen. Daraus ergibt sich eine Anordnung aus Totzeit und weiterem Teilsystem. Das Luftaufnahmeverhalten lässt sich als Verzögerungsglied 1. Ordnung auffassen.

3. Parameteridentifikation

Mit den getroffenen Annahmen lässt sich das Luftaufnahmeverhalten des Öls als Übertragungsfunktion angeben zu:

$$G_{LD}(s) = \frac{V_s}{T_s s + 1} \cdot e^{-T_T s} \quad (3.3)$$

In der im Bild 3.6 dargestellten Sprungantwort beträgt die Totzeit T_T ungefähr sieben Sekunden. Während die Totzeit manuell ermittelt worden ist, sind die Parameter des PT₁-Glieds mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt worden. Die gute Übereinstimmung des Modells mit der Strecke kann anhand der Systemantworten dem Bild entnommen werden.

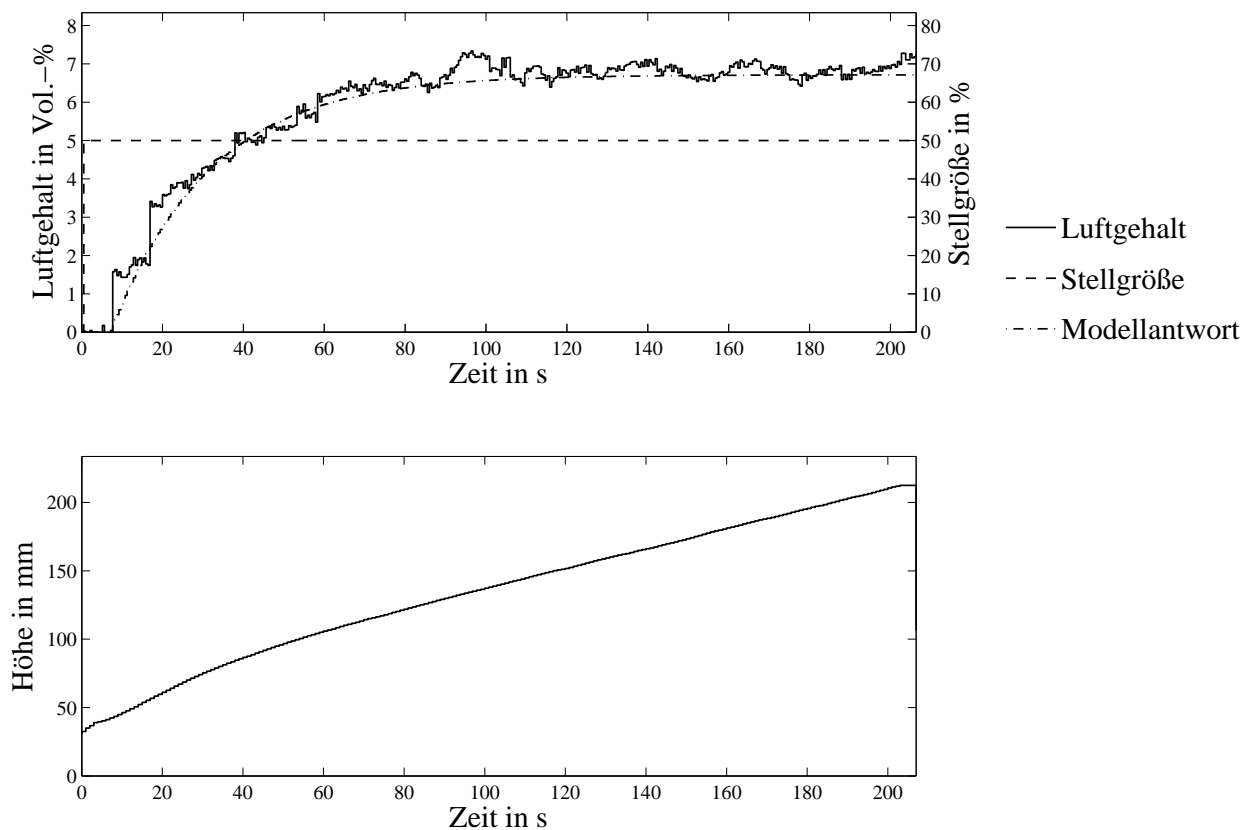


Bild 3.6: Vergleich von Strecke und Modell bei sprungförmiger Anregung und Verlauf der gemessenen Schaumhöhe

4. Beurteilung

Betrachtet man das Bodediagramm (Bild 3.7), so wird ersichtlich, dass die Totzeit entscheidenden Einfluss auf die Güte der Regelung des Systems hat, da bei einer erheblichen Totzeit mit einem wesentlich schlechteren Regelverhalten zu rechnen ist. Nur durch Reduzierung der Totzeit lässt sich die Qualität der Regelung verbessern.

Für die Regelung des Luftgehaltes wird ein gutes Führungsverhalten gefordert, um die in Tabelle 3.1 genannten Kriterien zu erfüllen. Die Auslegung ist durch die gewählte Modellstruktur erfolgt. Die Regler sind so auf gutes Führungsverhalten ausgelegt worden, dass sie möglichst aperiodisch einschwingen. Eingesetzt werden ausschließlich PI- und I-Regler, um die anfangs genannten Randbedingungen aus Abschnitt 3.2 zu erfüllen.

Da die Schaumhöhe während des Verschäumens nicht messbar ist, ist nach Abschluss einer Messung bei Bedarf eine nachträgliche manuelle Offline-Optimierung der Reglerparameter durchgeführt worden.

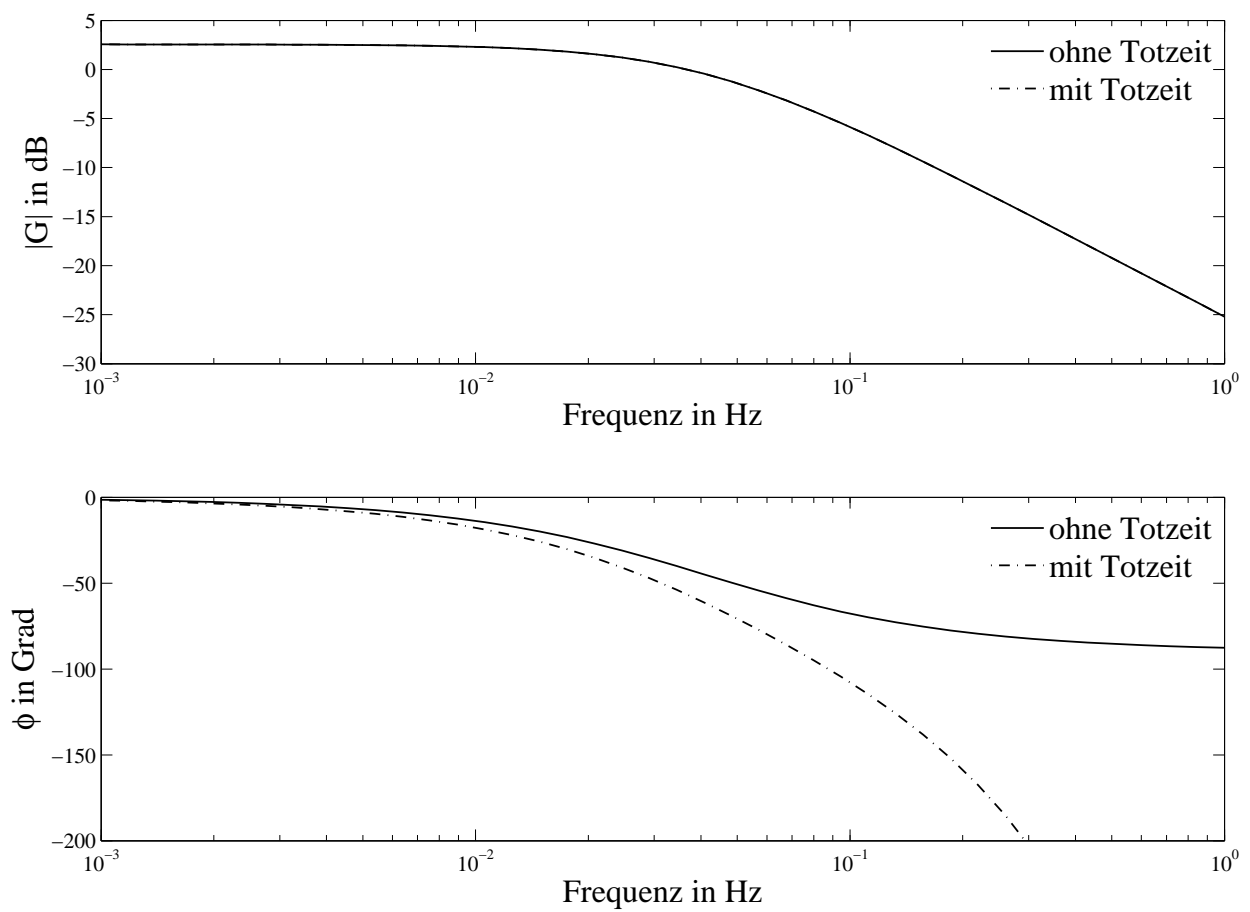


Bild 3.7: Bodediagramm des Streckenmodells

3.2.2 Regelung des Systems mit Lineardrossel

Im folgenden Abschnitt werden die Regelungen für verschiedene Öle vorgestellt und bewertet. Dabei lassen sich die Öle in zwei Gruppen unterteilen: die Gruppe der Öle, bei denen eine Regelung des Luftgehaltes möglich ist, und die, bei denen keine oder nur eine sehr schlechte Regelung möglich ist.

Im Weiteren werden Regelungen vorgestellt, die die genannten Anforderungen aus Tabelle 3.1 erfüllen, und auch Gegenbeispiele gebracht. Dieser Abschnitt schließt mit Beispielen für Fehlerquellen.

Gute Regelungen und Schaumaufbau

Die Verschäumungsdauer beträgt bei einer Messung $t_{\text{prüf}} = 900 \text{ s}$. Anschließend werden die Regelung, der Motor und die Luftzufuhr abgeschaltet und der Schaumzerfall durch das Kamerasystem aufgenommen. Danach werden die Schaumzerfallparameter offline ermittelt.

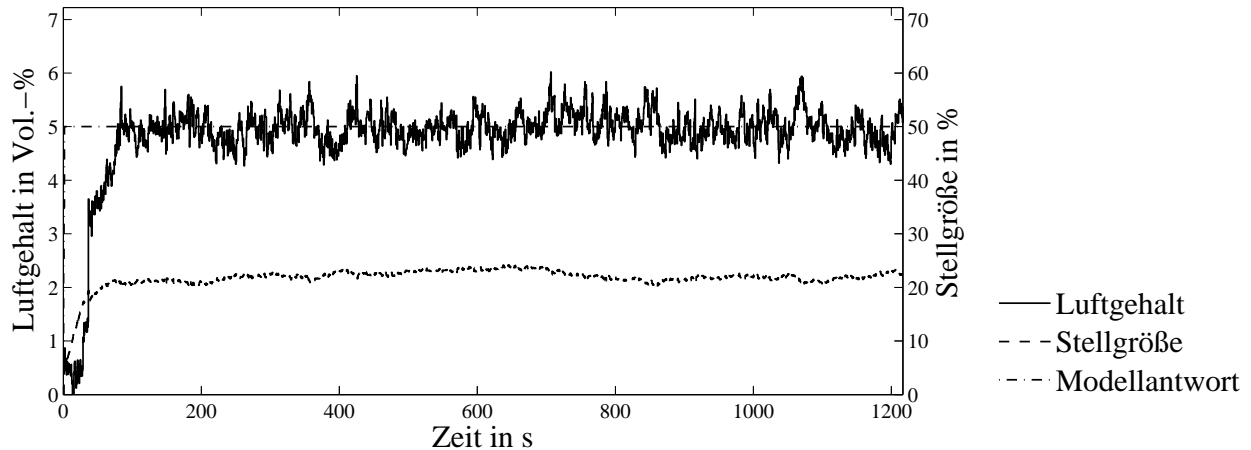


Bild 3.8: Regelung des Luftgehaltes mit Abweichungen bis zu $\pm 1 \text{ Vol.-%}$

Bild 3.8 zeigt den Luftgehaltsverlauf für $t = 1200 \text{ s}$. Die Führungsgröße wird bei $t = 0$ zugeschaltet. Anfangs gelangt keine Luft ins Öl, dann steigt der Luftgehalt sprunghaft an. Ein Überschwingen des Luftgehaltes ist nicht erkennbar.

Die Regelung ist gut eingestellt, die Stellgröße weist nur geringe Änderungen auf. Die Abweichungen im Luftgehalt von $\pm 1 \text{ Vol.-%}$ sind auf das Messrauschen und die Öleigenschaften

zurückzuführen. Dadurch ist keine Verbesserung durch eine nachträgliche Regleroptimierung zu erwarten. Diese Regelung erfüllt ihre Aufgabe daher lediglich zufriedenstellend.

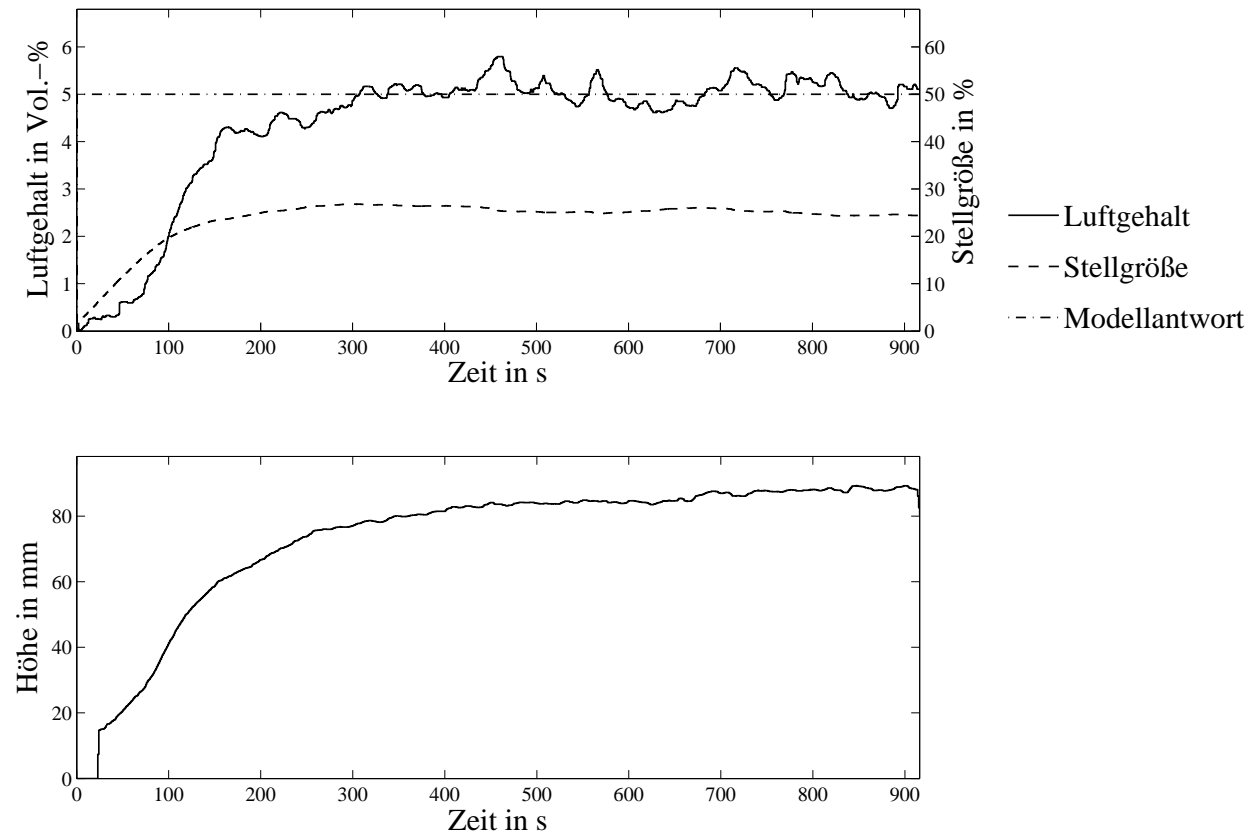


Bild 3.9: Regelung des Luftgehaltes mit Abweichungen bis zu ± 1 Vol.-% und monoton steigender Schaumhöhe

Eine Regelung mit gleicher Güte des Luftgehaltes ist in Bild 3.9 dargestellt. Im Gegensatz zur vorherigen Messung gelangt hier die Luft sehr viel später ins Öl und die Änderung des Luftgehaltes erfolgt langsamer. Weiterhin sind ähnliche Abweichungen vom Sollwert zu erkennen. Das Einschwingverhalten erfüllt die in Tabelle 3.2 genannten Forderungen bezüglich des Einschwingverhaltens und wirkt sich positiv auf den Schaumaufbau aus. Die Schaumsäule baut sich mit steigendem Luftgehalt langsam auf und verharrt dann bis zum Verschäumungsende bei circa $h = 90$ mm. Die Güte der Regelung wird für dieses Öl ebenfalls als zufriedenstellend eingestuft.

Bild 3.10 zeigt augenscheinlich eine gute Regelung sowohl des Luftgehaltes als auch der Schaumhöhe. Lediglich der kurze sprungförmige Luftgehaltsanstieg bei $t = 375$ s fällt negativ auf. Ursache für eine schnelle Änderung kann nicht das Luftdrosselventil sein, da die Abweichung im Luftgehalt bei konstanter Stellgröße auftritt. Es muss daher eine Luftblase

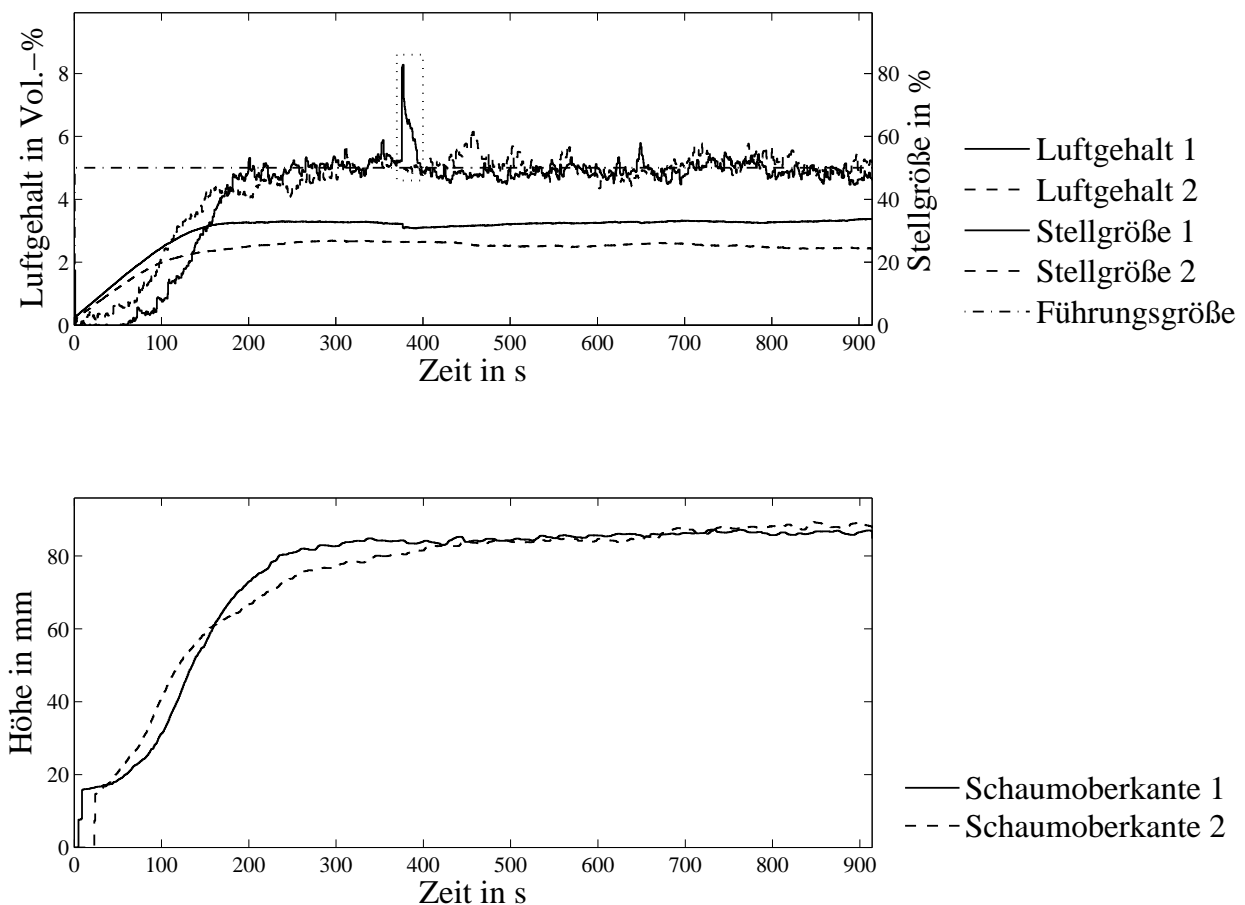


Bild 3.10: Vergleich der Luftgehalts- und Schaumhöhenverläufe zweier Messungen

sein, die sich in einem Totvolumen angesammelt hat. Sobald sie sich löst, wird sie durch das Luft-Öl-Gemisch mitgerissen und erzeugt so einen kurzzeitigen Anstieg im Luftgehalt. Dieser Vorgang hat keinen Einfluss auf die aufgebaute Schaumhöhe.

Die Verläufe des Volumenstromes aus Bild 3.11 bestätigen, dass keine Fehlfunktion des linearen Luftdrosselventils vorliegt. In diesem Fall wäre ein Anstieg des Volumenstroms zu diesem Zeitpunkt zu erkennen. Ein negativer Volumenstrom bedeutet, dass Luft ins Öl eingebracht wird, ein positiver, dass die Luft zurück in die Zuführung gepresst wird. Da kein Öl oder ölhaltige Luft in die Messtechnik der Luftzufuhr gelangen sollen, ist ein Rückschlagventil am Einspritzstutzen eingebaut. Im Luftzweig kann sich somit kein kontinuierlicher Luftstrom entgegen der Saugrichtung einstellen. Der in Bild 3.11 dargestellte Unterdruck ist für beide Messungen gleich und stellt sich bei circa 0,28 kPa ein.

Abgesehen von dem einzelnen Ausreißer liegt der Luftgehalt für beide Messungen in einem Toleranzbereich von $-0,5 \text{ Vol.-%}$ bis 1 Vol.-% . Bei einem kontinuierlichen Schaumaufbau

ohne Überspringen erreichen beide Messungen der Schaumhöhe den gleichen Endwert von circa $h = 85 \text{ mm}$. Das Ergebnis ist als zufriedenstellend zu bewerten.

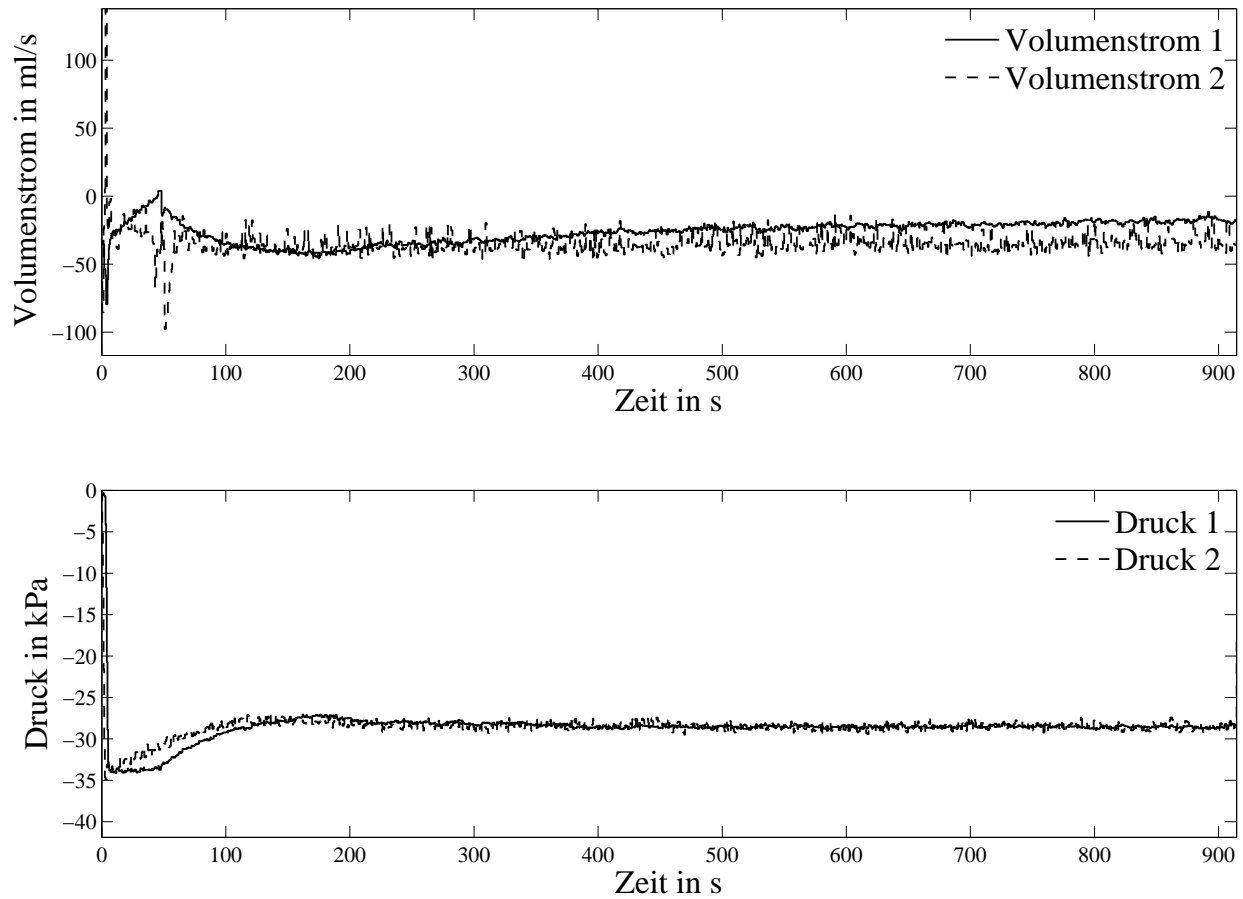


Bild 3.11: Unterdruck und Volumenstrom der Vergleichsmessung zur Eingrenzung des Fehlers im Luftgehaltsverlauf

Schlechte Regelung und Schaumaufbau

Ein stark schwankender Luftgehalt ist in Bild 3.12 mit zwei Messreihen abgebildet. Beide Luftgehalte verharren anfangs bei circa 0,5 Vol.-% und steigen dann zügig an. Nach einem langen Überschwingen variiert der Luftgehalt um ± 1 Vol.-%, obwohl nur kleine Änderungen an den Stellgrößen zu beobachten sind. Da der in Bild 3.13 dargestellte Volumenstrom über den Verschäumungszeitraum annähernd konstant bei circa 30 ml/s liegt und sich ein konstanter Unterdruck eingestellt hat, lassen sich keine Rückschlüsse auf die Ursachen der Schwankungen des Luftgehalts ziehen.

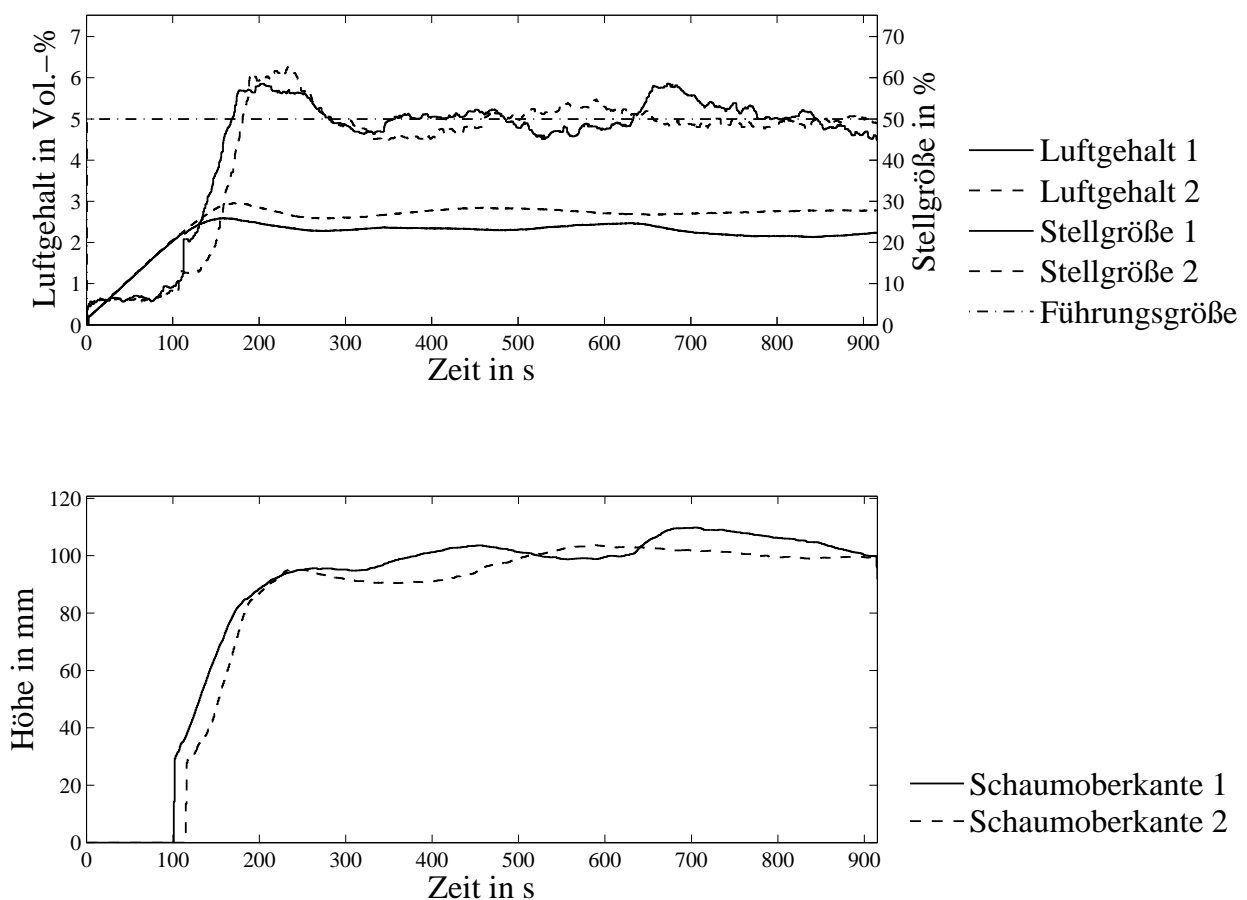


Bild 3.12: Luftgehaltsregelung mit zu stark schwankendem Luftgehalt und nicht monoton steigendem und somit nicht reproduzierbarem Schaumaufbau

Die Auswirkungen des stark schwankenden Luftgehaltes lassen sich bei den beiden Messungen in den resultierenden Schaumhöhen erkennen. Die Anstiege der beiden Schaumsäulen für $t < 250$ s verlaufen zwar zeitversetzt aber ähnlich. Die Höhen variieren ab diesem Zeitpunkt

erheblich und nehmen keine stationären Endwerte an. Der Schaumaufbau und die Regelung für dieses Öl werden daher als schlecht bewertet.

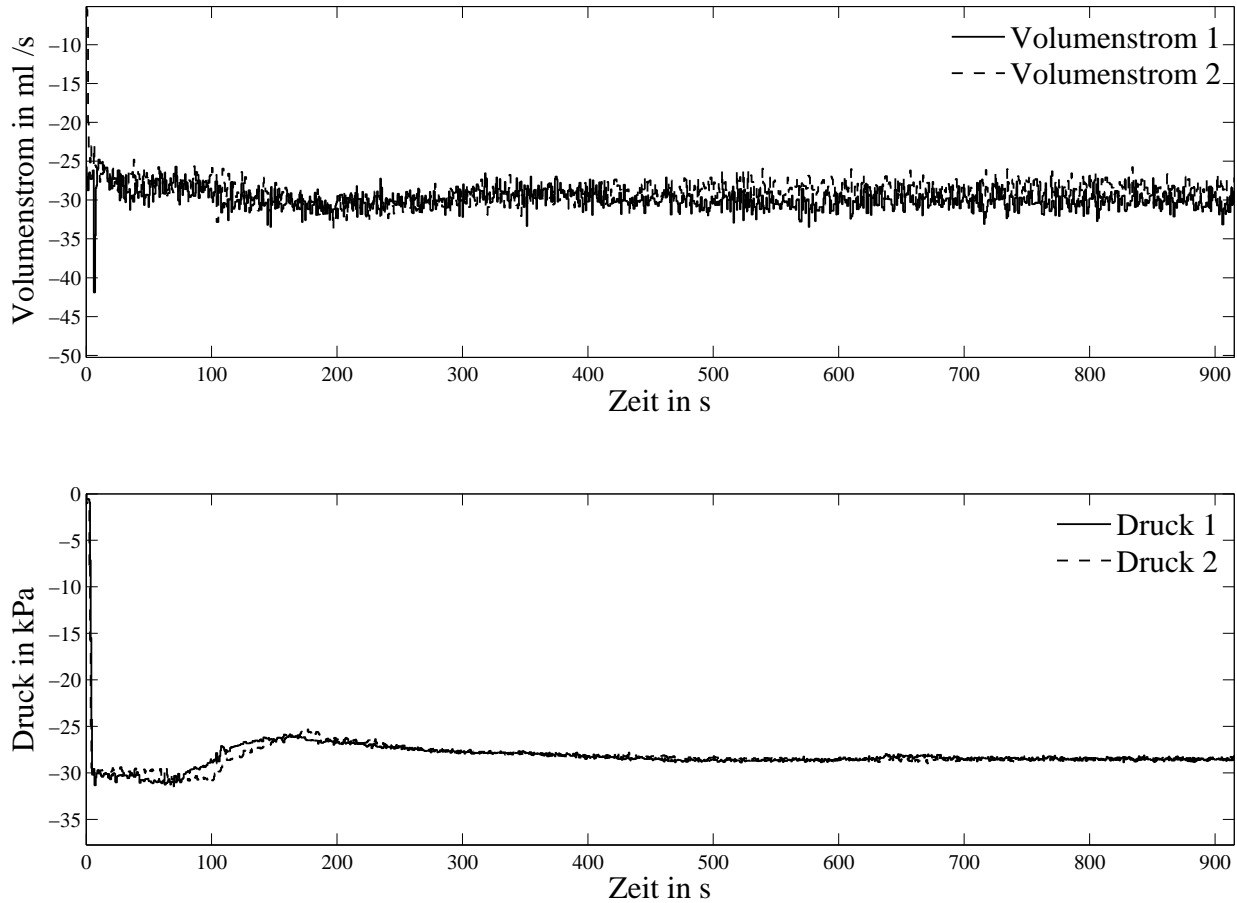


Bild 3.13: Unterdruck und Volumenstrom zu den Messungen aus Bild 3.12

Der Luftgehalt des folgenden Öls lässt sich, abgesehen von einem starken Überspringen (bis über 2 Vol.-%) zu Beginn der Messung, gut auf die geforderten 5 Vol.-% \pm 0,5 Vol.-% nach der Einschwingzeit von $t = 300$ s regeln. In Bild 3.14 werden zwei Messungen mit demselben Öl und identischen Reglereinstellungen verglichen. Auffallend bei diesem Öl ist das sehr späte und auch sehr schnelle Ansteigen des Luftgehaltes.

Es kann kein gutes Ergebnis im Schaumaufbau erzielt werden. Die Höhe des Schaums während der ersten Messung steigt auf ein Maximum von $h = 130$ mm an, sinkt dann innerhalb von $\Delta t = 400$ s auf einen Endwert von circa $h = 118$ mm. Ursache dafür kann sein, dass die benetzte Glasoberfläche einen weiteren Schaumaufbau erschwert. Anders verhält sich die Schaumsäule während der zweiten Messung. Nach dem großen Überspringen im Luftgehalt steigt hier die Schaumsäule langsam weiter an. Nach einer geringen Reduzierung erreicht

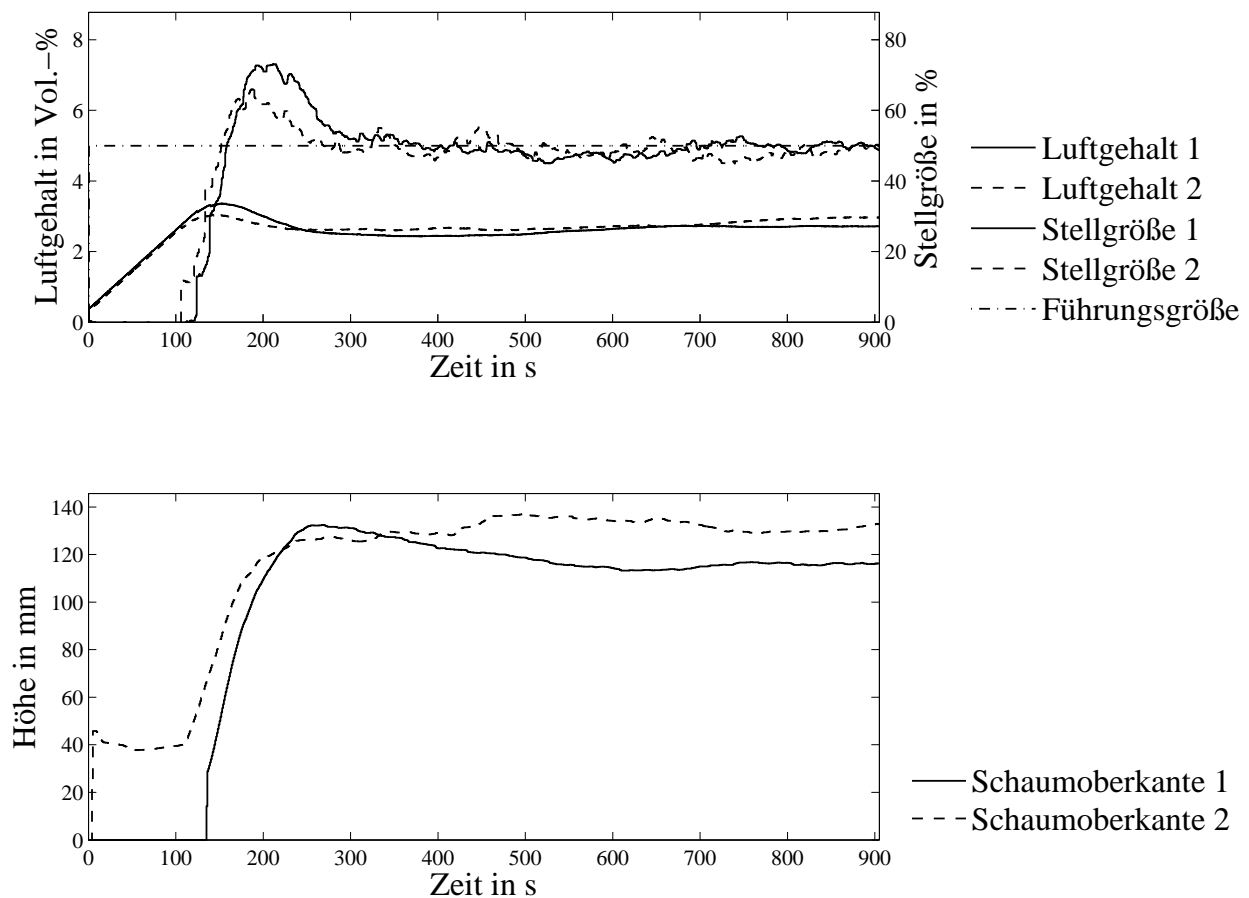


Bild 3.14: Einschwingverhalten führt zu nicht reproduzierbarer Schaumhöhe

diese am Ende des Verschäumens einen um $\Delta h = 20 \text{ mm}$ höheren Endwert. Die Regelung erfüllt ihre Aufgabe nicht.

Zur Verbesserung des Einschwingverhaltens sind auch Untersuchungen eines gesteuerten Anfahrens des Systems erfolgt. Dabei ist eine konstante Stellgröße entweder zeitgesteuert oder in Abhängigkeit vom Luftgehalt vorgegeben worden. Bei Erreichen des Endwertes der Vorgabe ist von der Steuerung auf die Regelung umgeschaltet worden. Vorteilhaft bei diesem Ansatz ist, dass sich bereits ein Öl-Luft-Gemisch gebildet hat und die Regeldifferenz somit geringer ist. Ein Überschwingen des Luftgehaltes ist unwahrscheinlicher. Bild 3.15 zeigt den Verlauf der Stellgröße sowie den gemessenen Luftgehalt. Die Kontrolle des Schaumhöhenverlaufs ergibt jedoch, dass wegen des Schrumpfens der Säule nach circa $t = 200 \text{ s}$ die Messung verifiziert werden muss, da der Luftgehaltsverlauf keine Hinweise auf die Ursache gibt.

In Bild 3.16 sind der entstandene Unterdruck und der Volumenstrom dargestellt. Während der gesamten Messung bleibt der Druck konstant. Im Gegensatz dazu unterliegt der Vo-

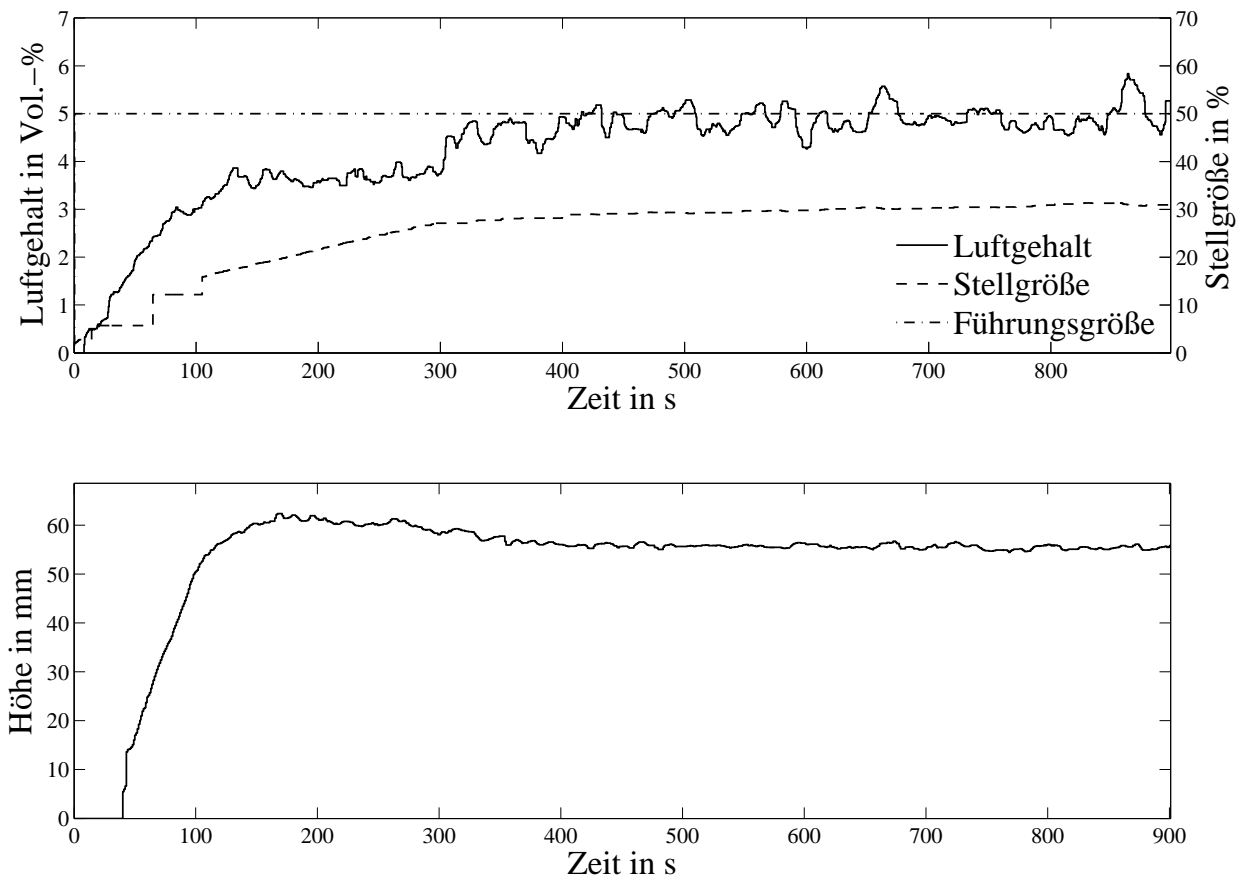


Bild 3.15: Untersuchung des Verhaltens bei anfänglich gestelltem Einbringen der Luft

lumenstrom Schwankungen. Trotz konstanten Unterdrucks und konstanter Stellgröße sind schnelle und große Änderungen des Volumenstroms zu erkennen. Auf Grundlage der vorliegenden messbaren Systemgrößen ist dieser Effekt nicht zu erklären. Zum einen liefert das Stellglied keine Rückmeldung über den aktuellen Öffnungsquerschnitt und zum anderen sind lokale Zustände des Gemischs am Lufteinlass nicht messbar.

Nachdem Regelungen für verschiedene Öle und der jeweils resultierende Schaumaufbau für das Laborgerät mit einem linearen Drosselventil vorgestellt und nach der Tabelle 3.1 bewertet worden sind, werden im folgenden Abschnitt die Messfehler und deren Ursachen betrachtet.

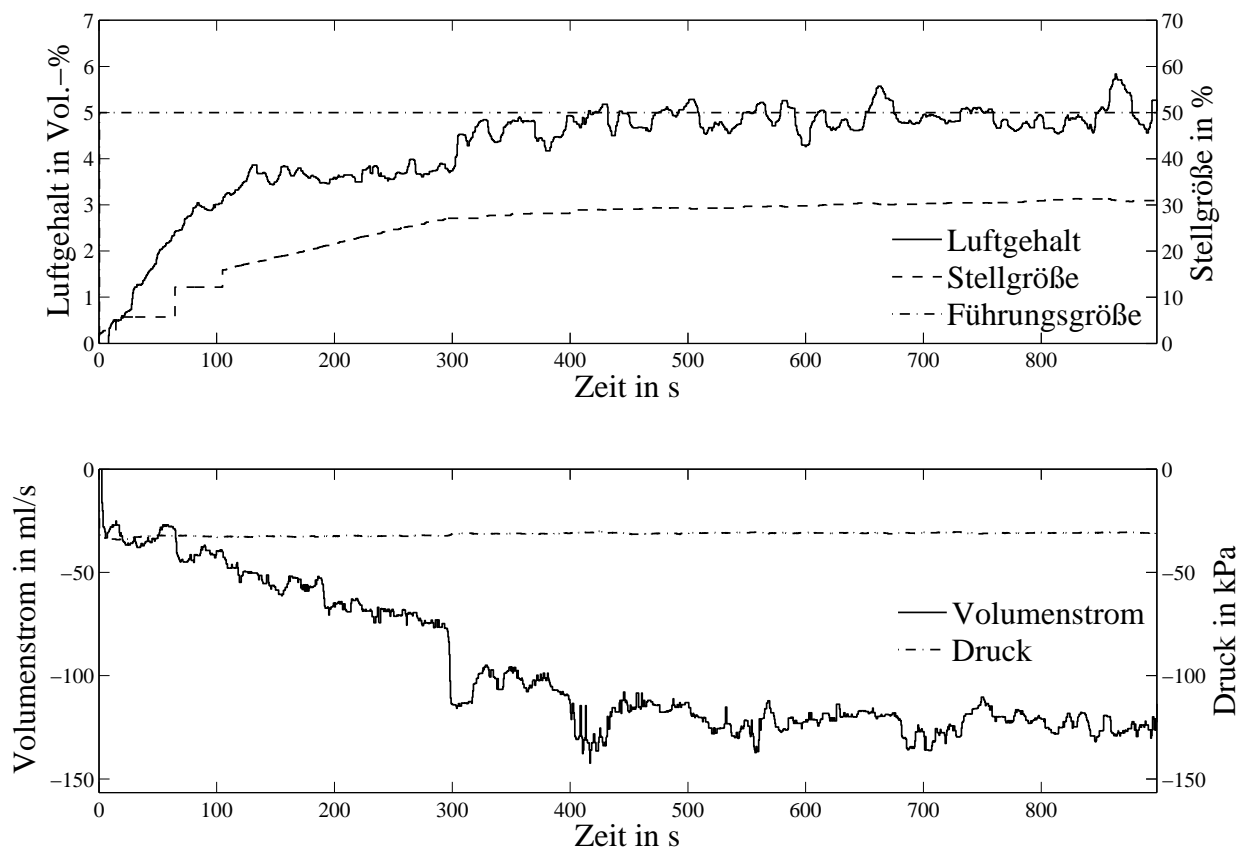


Bild 3.16: Entstehender Unterdruck und die Auswirkungen des Volumenstroms auf den Luftgehalt

Fehler und ihre Ursachen

Im folgenden Abschnitt werden die drei am häufigsten auftretenden Messfehler untersucht. Die Fehler treten allein oder in beliebiger Kombination auf. Um die Ursachen einzugrenzen, werden sowohl der Aufbau des Laborgerätes, als auch die Mess- und Stellglieder auf Fehlfunktion untersucht. Von einem Fehlverhalten der eingesetzten Software oder der Kamera ist nicht auszugehen.

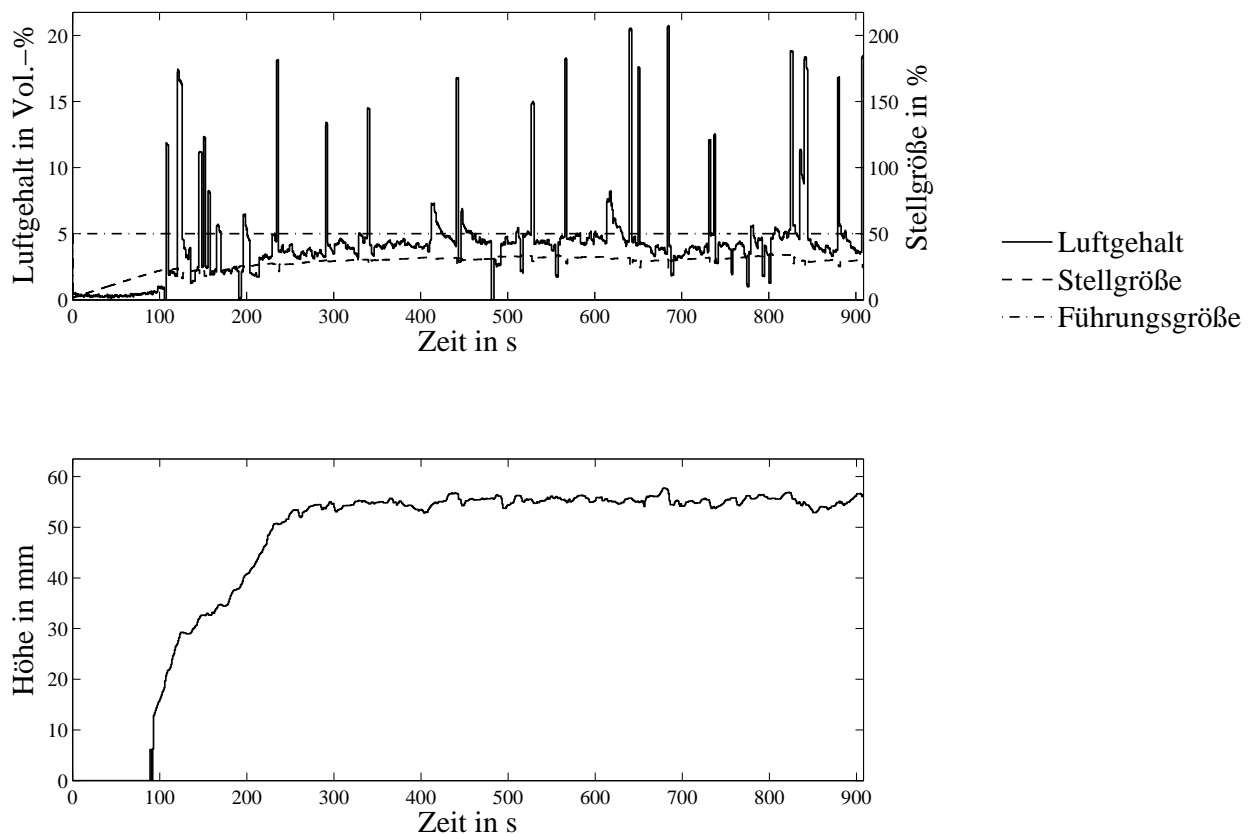


Bild 3.17: Kurzzeitige Spitzen, die teilweise den Schaumaufbau beeinflussen

Bei einigen Ölen stellt sich keine konstante Höhe der Schaumsäule ein, sondern die Höhe schwankt relativ stark. Ursache dafür ist die nicht kontinuierliche Luftzufuhr. Bild 3.17 zeigt den Verlauf der Schaumhöhe und den dazugehörigen Luftgehalt des Öls. Deutlich erkennbar sind die Spitzen im Luftgehalt und deren Einfluss auf die Schaumhöhe. Dabei nimmt die Kamera zur Aufzeichnung der Höhe pro Sekunde ein Bild auf. Die Regelung reagiert auf diese Spitzen mit Reduzierung der Stellgröße.

Eine Ursache für die Zeitpunkte dieser Spitzen ist weder in der Amplitude der Stellgröße zu erkennen, noch besteht ein zeitlicher Zusammenhang. Daraus folgt, dass ein sprungförmiger

Anstieg des Luftgehaltes nicht auf das Stellglied oder die Regelung zurückgeführt werden kann.

Die Ursache liegt im Aufbau des Hydraulikkreislaufs. Das Rohrsystem weist bauartbedingte Totvolumina z.B. in T-Stücken auf, in denen sich die eingebrachte Luft ansammeln kann. Erst wenn diese angesammelte Luftmenge („Luftblase“) groß genug ist, um vom Luft-Öl-Gemisch mitgerissen zu werden, wird eine Überhöhung des Luftgehaltes detektiert. Anschließend kann sich aufs neue Luft ansammeln. Dieser Prozess geschieht zufällig. Eine Vorhersage, wann eine Luftblase mitgerissen wird, kann nicht getroffen werden.

Weiterhin ist der langsame Anstieg des Luftgehaltes zu Beginn der Messung erkennbar. Erst nach circa $t = 100\text{ s}$ steigt der Luftgehalt sprungförmig an. Eine mögliche Ursache dafür ist die Lineardrossel. So ist der Öffnungsquerschnitt des Luftdrosselventils während des Versuches nicht überprüfbar. Nach Herstellerangaben lässt sich die Öffnung zwischen 0 Vol.-% und 100 Vol.-% mit einer Spannung zwischen 0 V und 6 V einstellen. Über einen Spannungs-Frequenz-Wandler wird ein Schieber gegen eine Feder angehoben. Falls Öl bzw. Öldämpfe in den Luftzweig gelangen, kann ein ordnungsgemäßer Betrieb des Drosselventils nicht mehr gewährleistet werden. Bild 3.18 zeigt den Verlauf eines solchen verunreinigten Luftdrosselventils. Die Stellgröße bei einer guten Regelung liegt bei etwa 3 V, hier wird das Drosselventil am Anfang der Verschäumung mit maximaler Stellgröße beaufschlagt, um eine Reaktion im Luftgehalt zu erreichen. Es gelangt somit zu viel Luft ins Öl und die Luftdrossel wird geschlossen. Für ein erneutes Öffnen muss eine Spannung von mindestens 4 V anliegen, dabei wird zu viel Luft eingebracht. Somit fängt das System an zu schwingen, was deutlich an der Stellgröße und am Schaumaufbau erkennbar ist. Der Fehler lässt sich nur durch Reinigung oder Tausch des linearen Drosselventils beheben.

Nachdem die bisherigen Fehler auf den Aufbau des Hydraulikkreises und das Stellglied zurückzuführen sind, kann der folgende Fehler nicht eindeutig zugeordnet werden. Bild 3.19 stellt einen Schaumaufbau dar, bei dem zu Beginn die beiden bekannten Fehler auftreten. Zuerst wird keine Luft eingebracht, dann treten starke Luftgehaltsänderungen auf und die Schaumsäule wird höher. Durch die sprungförmigen Änderungen des Luftgehaltes steigt die Schaumhöhe jedoch nicht kontinuierlich. Ab circa $t = 140\text{ s}$ stellt sich ein konstanter Luftgehalt von 4 Vol.-% ein, die Stellgröße steigt dabei langsam weiter an. Nach circa $t = 240\text{ s}$ ändert sich der Luftgehalt schlagartig und zeigt einen Verlauf, der einem DT_1 -Glied ähnelt, welches nach $t = 40\text{ s}$ abgeklungen ist. Ausgehend von einer exakten Luftgehaltsbestimmung und dem damit verbundenen Schaumaufbau kann über die Herkunft der Luft nur gemutmaßt werden. Mögliche Fehlerquellen sind dabei die Luft im System und Messfehler. Entscheidend für die Regelung ist dabei nur, dass dieser Fehler im Betrieb zu spät zu erkennen ist und

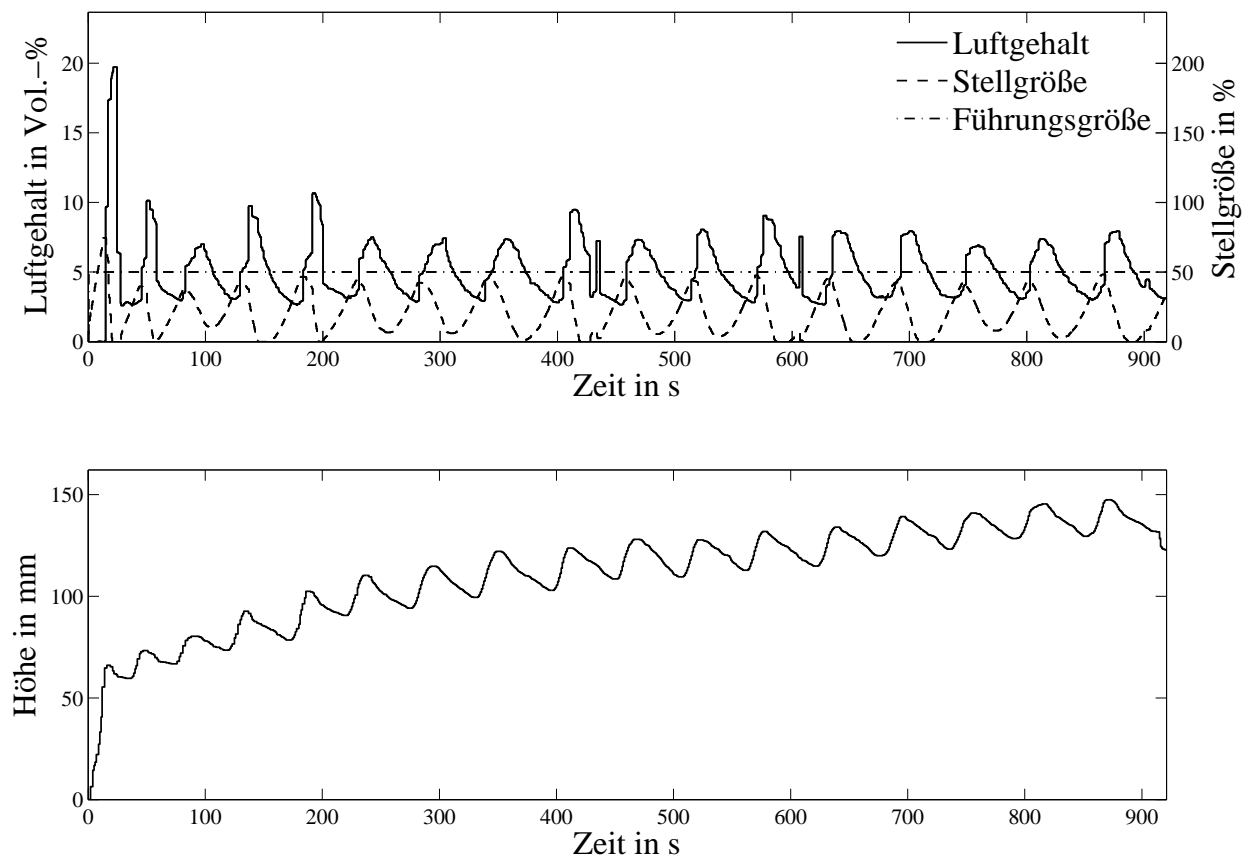


Bild 3.18: Fehlfunktion des Stellgliedes verhindert die Regelung des Luftgehaltes und führt zu nicht reproduzierbarem Schaumaufbau

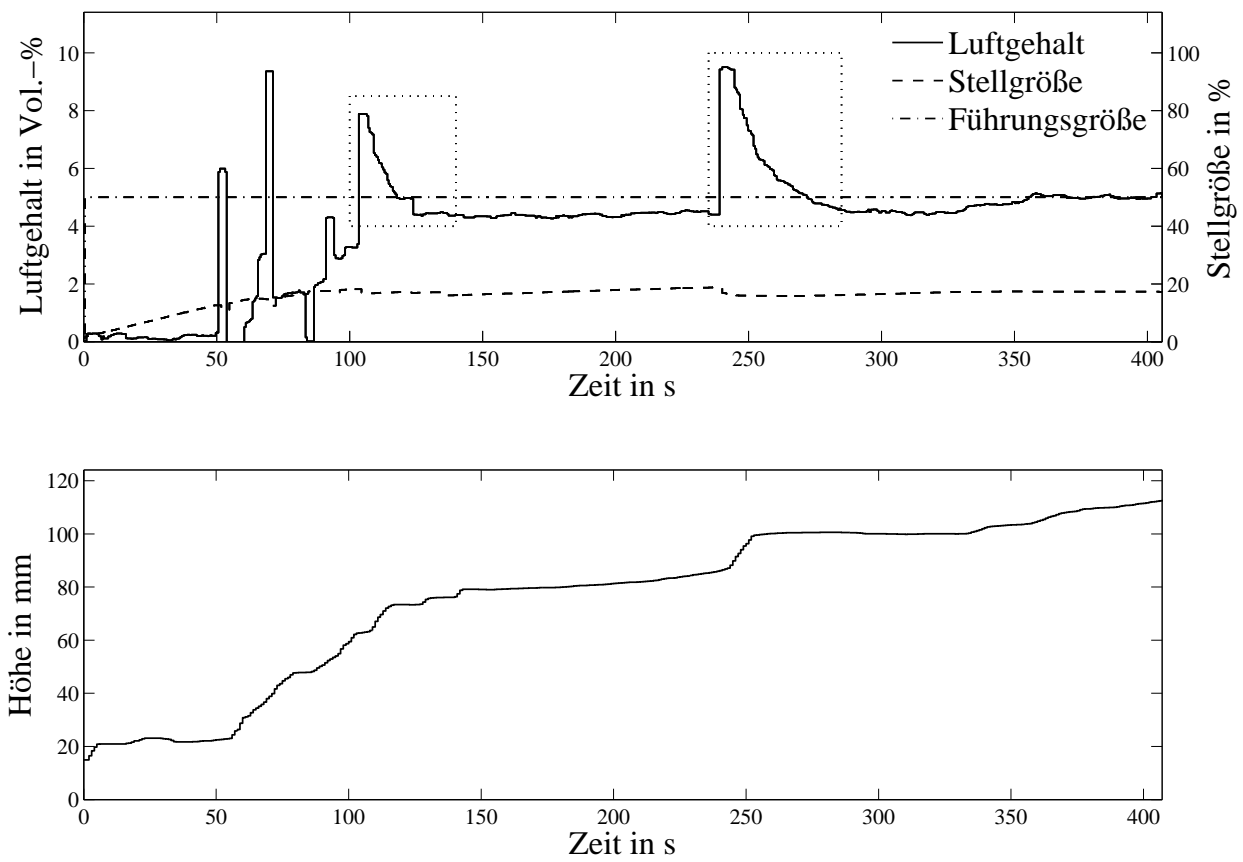


Bild 3.19: DT_1 -ähnliche Abweichungen im Luftgehalt und die Auswirkungen auf die Schaumhöhe

somit keine Möglichkeit zur Korrektur besteht.

Bild 3.20 zeigt die Verläufe des Luftgehaltes sowie der Stell- und Führungsgröße aus Bild 3.17. Im Vergleich dazu sind Volumenstrom und Druck aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich trotz stabilen Drucks kein konstanter Volumenstrom einstellt. Der Hydraulikaufbau des Laborgerätes ist in Bild 3.1 abgebildet.

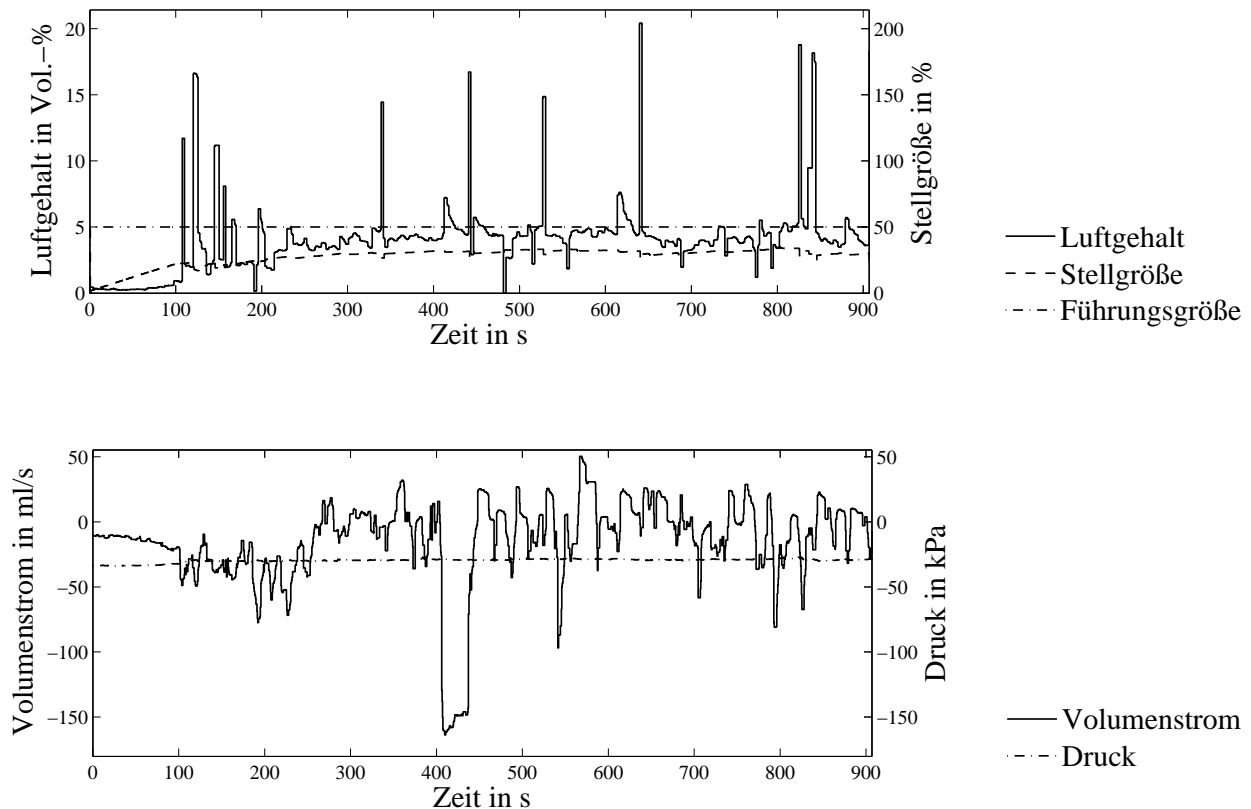


Bild 3.20: Spitzen im Luftgehalt im Zusammenhang mit Druck und Volumenstrom

Zusätzlich zu den vielen kurzzeitigen Änderungen des Volumenstroms ist auch die starke Abweichung nach circa $t = 400$ s auffällig. Die Ursache für die Volumenstromzunahme lässt sich nicht erkennen, weder die Stellgröße der Lineardrossel noch der Unterdruck geben einen Hinweis. Um einen konstanten Schaumaufbau zu gewährleisten, muss die Luft kontinuierlich und ohne sprunghafte Änderungen ins Öl eingebracht werden.

Um eine konstante Luftmenge in das Öl zu fördern und die Kopplung zwischen dem Volumenstrom und dem Unterdruck aufzuheben, wurde der Luftzweig des Laborgerätes umgebaut. Das Prinzip der Ansaugung von Luft durch den entstehenden Unterdruck und Variation der Öffnungsfläche, wurde durch die Einspritzung der Luft mit einer Düse mit konstantem Überdruck ersetzt.

3.2.3 Charakteristik der Einspritzdüse

Der vorherige Abschnitt zeigt, dass das Verfahren, die Luft durch den entstehenden Unterdruck ins Öl zu fördern, einige Nachteile hat. So lässt sich bei konstantem Saugdruck kein gleichbleibender Volumenstrom einstellen und der Luftgehalt variiert je nach Öl. Um die Regelung zu verbessern, wird die Drossel durch eine Einspritzdüse ersetzt. Die Luft wird nicht mehr durch den entstehenden Unterdruck eingesaugt, sondern mit konstantem Einspritzdruck von 0,1 MPa ins Öl eingebracht, um die Fehler zu minimieren. Für die Ankopplung der Einspritzdüse an den Ölkreislauf und zur Vermessung des Volumenstromes wird ein Luftschlauch mit einem Durchmesser von 2 mm verwendet.

Die verwendete Einspritzdüse für einen VW Caddy bzw. Touran Eco Fuel mit einem 2,0l BSX-Motor vom Typ 06G 906 039 fördert eine größere Luftmenge, als für die Regelung auf die gewünschten 5 Vol.-% benötigt wird. Zur Verringerung des Volumenstroms werden drei Reduzierhülsen mit unterschiedlichen Innendurchmessern verwendet, wie in Tabelle 3.2 angegeben.

Tabelle 3.2: Bohrungsdurchmesser und –querschnitt der Reduzierhülsen

Durchmesser in mm	Fläche in mm ²
0,6	0,2827
0,8	0,5027
1,0	0,7854

Die Bestimmung der Volumenströme für die einzelnen Reduzierhülsen erfolgt mit der in Bild 3.21 dargestellten Anordnung. Dabei werden die Öffnungszeit der Düse, die Taktfrequenz und der Einspritzdruck konstant gehalten. Aus der Wasserverdrängung lässt sich das Luftvolumen bestimmen. Die Druckerhöhung durch die steigende Wassersäule wird dabei berücksichtigt. Der Druck p setzt sich aus dem Umgebungsdruck p_0 , dem Nullpunkt der Messung h_0 und der Höhendifferenz Δh der Wassersäule zusammen.

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.4)$$

Dabei bezeichnet ρ die Dichte des Wassers bei Raumtemperatur. Die geförderte Masse m der Luft lässt sich durch die allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase beschreiben. Die Zustandsgrößen sind die Temperatur T , der Druck p und das Volumen V . R_s gibt die Gas-konstante für Luft an.

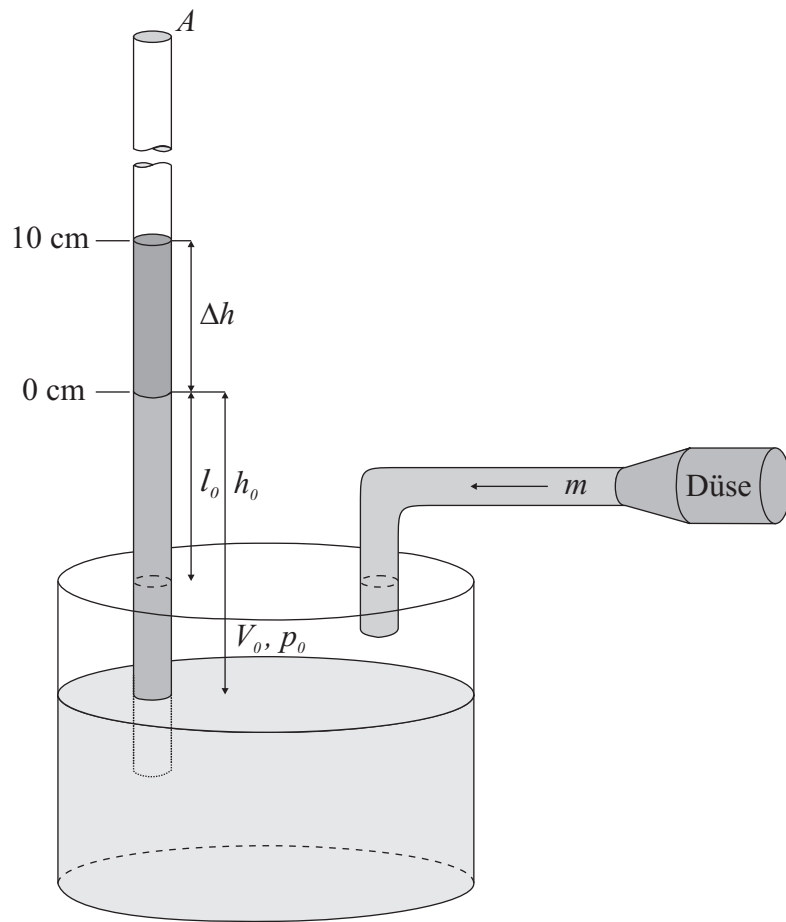


Bild 3.21: Versuchsanordnung zur Vermessung der Einspritzdüse

Der Offset-Einfluss durch den Nullpunkt der Messung wird durch m_0 berücksichtigt.

$$m = \frac{p \cdot V}{R_s \cdot T} - m_0 \quad (3.5)$$

Aus den beiden Gleichungen 3.4 und 3.5 und unter Berücksichtigung der Taktfrequenz f folgt dann das Volumen V :

$$V = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \frac{R_s \cdot T}{f \cdot p} \quad (3.6)$$

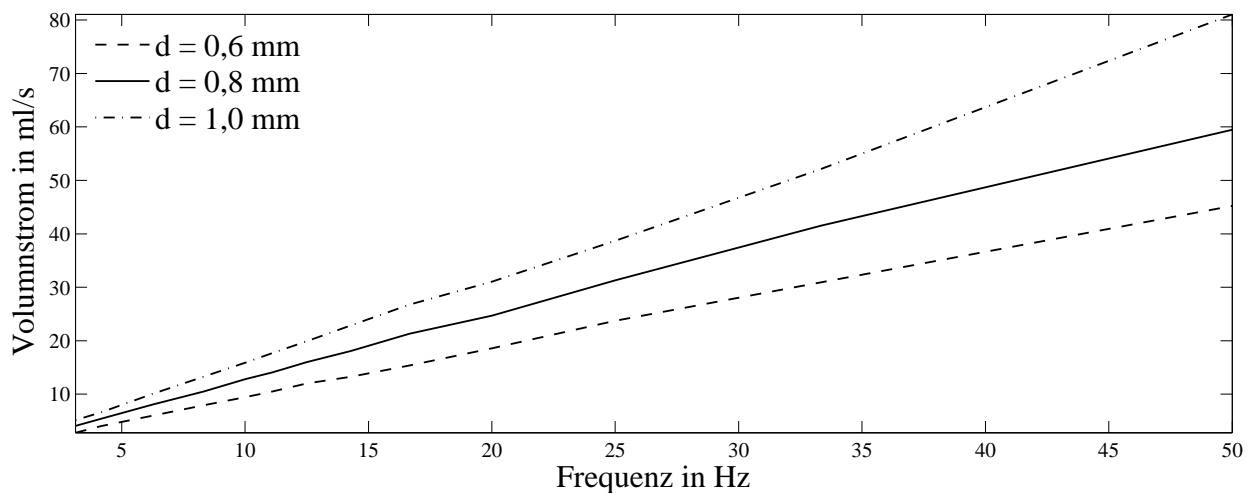


Bild 3.22: Volumenstrom für unterschiedlichen Reduzierhülsendurchmesser d

Der Volumenstrom \dot{V} wird für die einzelnen Durchmesser in mehreren Messungen bestimmt. Es ergibt sich daraus die in Bild 3.22 dargestellte Charakteristik der Einspritzdüse. Das durch die Einspritzdüse eingebrachte Luftvolumen liegt in der gleichen Größenordnung wie beim Verfahren mit linearem Drosselventil. Daher ist der Austausch der beiden Komponenten möglich.

3.2.4 Topologie des Systems mit Einspritzdüse

Die Änderung des Einspritzverfahrens beeinflusst die Regelung entscheidend. Die Systemtopologie aus Abschnitt 3.1.2 wird um einen digitalen Signalprozessor (DSP) zur Ansteuerung der Einspritzdüse erweitert, da eine konstante sehr kurze Einspritzdauer gewährleistet werden muss. Dieses ist mit dem PC nicht möglich. Die resultierende Systemtopologie der Anlage ist in Bild 3.23 dargestellt. Die SPS steuert noch immer die Schaltventile (8) an. Die Luftdrossel entfällt. Dafür wird ein DSP mit Leistungselektronik für die Ansteuerung der Einspritzdüse (10) hinzugefügt. Über analoge Verbindungen (9) erfolgt die bidirektionale Übertragung der Prozessdaten zwischen DSP und PC. Im verwendeten Messprogramm entspricht die eingestellte Zykluszeit der Digital-/Analogwandlerkarte bestenfalls der Einschaltdauer der Einspritzdüse. Eine Erzeugung solcher kurzen Signale ist mit dem verwendeten Programm entweder durch Jitter sehr ungenau oder nicht möglich. Durch den Einsatz des DSPs wird diese Problematik umgangen.

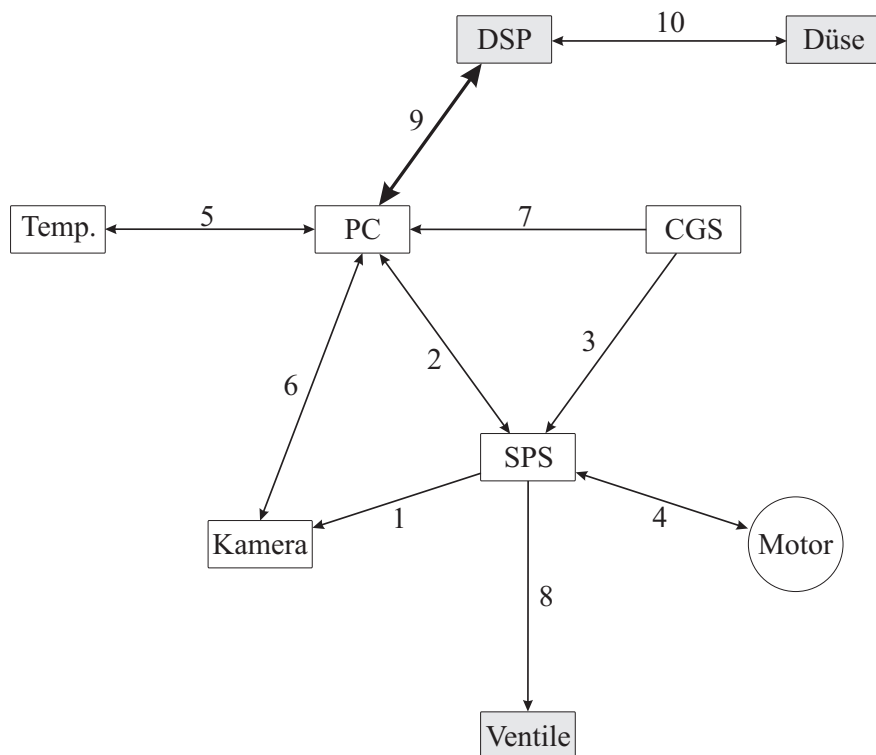


Bild 3.23: Neue Systemtopologie

Dadurch steigt die Vernetzung der Anlage. Ebenso ist eine erhöhte Einkopplung von Störungen auf den Leitungen die Folge, die sich durch eine geeignete Verlegung der Leitungen zwar minimieren aber nicht vollständig beheben lässt. Für die Signalaufbereitung bedeutet dies

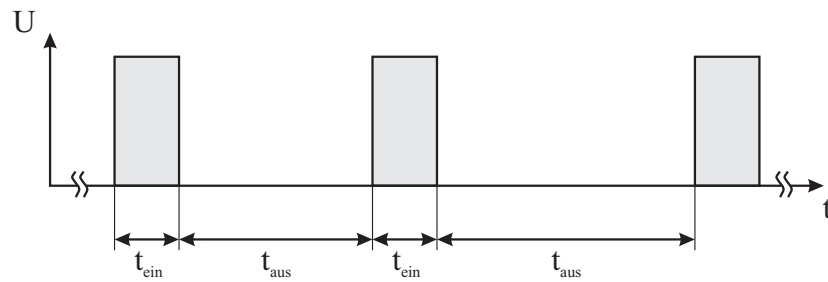


Bild 3.24: PFM-Ansteuerung der Einspritzdüse

einen zusätzlichen Einsatz von Hard- und Softwarefiltern. Die Filterung der Prozessgrößen erfolgt zweistufig.

Ein Hardwarefilter begrenzt den Frequenzbereich, so dass keine Aliasing-Fehler durch die Abtastung auftreten. Mit einem Softwarefilter werden anschließend periodische Störungen ausgefiltert. Die gefilterten Prozessgrößen werden für die Regelung genutzt. Die berechnete Stellgröße wird als analoge Spannung dem PC und als pulsfrequenzmoduliertes Signal (PFM) der Einspritzdüse zugeführt. Der Verlauf der Einspritzdüsenansteuerung ist in Bild 3.24 dargestellt.

Über den Regelungsalgorithmus wird die Pausendauer t_{aus} der Düse bestimmt, die Einschaltzeit t_{ein} ist konstant.

Durch den Einsatz des DSPs wird gewährleistet, dass die Regelung äquidistant ausgeführt wird. Ferner können beliebige Reglerstrukturen mit Begrenzungen und umschaltbaren Parametersätzen oder Führungsfiltren implementiert werden. Die Möglichkeit zur freien Gestaltung der Filter zur Signalaufbereitung rechtfertigt den zusätzlichen Aufwand. Einige Unterschiede sind in Tabelle 3.3 angegeben.

Tabelle 3.3: Kosten-Nutzen-Analyse

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Beliebige Reglerstrukturen • Beliebige Filterstrukturen • Oversampling • Einsatz von Beobachtern 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzlicher DSP • Erhöhter Datenaustausch • Einkopplung von Störungen • Zusätzliche Ansteuerelektronik

3.2.5 Modellbildung des Systems mit Einspritzdüse

Für die Wahl des Modells und die Bestimmung der Parameter wird das vorliegende System zuerst klassifiziert. Die Vielzahl der nichtlinearen dynamischen Systeme ermöglicht keine eindeutige und vollständige Zuordnung. Die häufigsten Ansätze zur Identifikation dieser Systeme stellen die blockorientierten nichtlinearen Modelle dar. Sie unterteilen das Modell in ein statisches nichtlineares Teilsystem \mathcal{NL} und ein dynamisches lineares Teilsystem $F(s)$. Dabei kommen das Hammerstein-Modell (Bild 3.25) und das Wiener-Modell (Bild 3.27) in der Literatur häufig vor [Rau03]. Sie unterscheiden sich in der Anordnung der jeweiligen Teilsysteme. Beim Hammerstein-Modell ist das lineare dynamische System dem nichtlinearen nachgeschaltet, wohingegen es sich beim Wiener-Modell umgekehrt verhält.

Eine Kombination der beiden Prozessmodelle ist möglich. Bild 3.26 zeigt den Aufbau eines Hammerstein-Wiener-Modells, bei dem die Nichtlinearitäten das lineare Teilsystem umschließen. Das Pendant dazu ist die umgekehrte Anordnung (Wiener-Hammerstein-Modell), wie in Bild 3.28 dargestellt. Eine weitere wichtige Modellstruktur ist in Bild 3.29 abgebildet. Charakteristisch für das Differentialgleichungsmodell ist die in der Rückkopplung befindliche statische Nichtlinearität \mathcal{NL} .

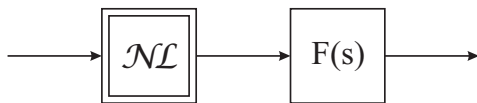


Bild 3.25: Hammerstein-Modell

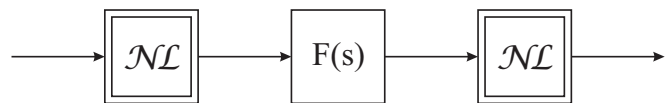


Bild 3.26: Hammerstein-Wiener-Modell

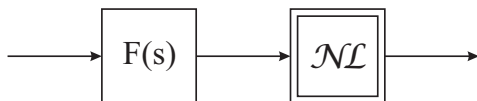


Bild 3.27: Wiener-Modell

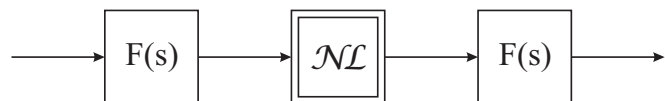


Bild 3.28: Wiener-Hammerstein-Modell

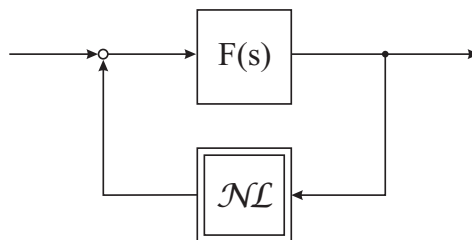


Bild 3.29: Nichtlineares Differentialgleichungsmodell

Nach den theoretischen Überlegungen wird zunächst auf den Umbau und die Erweiterung der Anlage und die damit entstehenden Randbedingungen eingegangen. Während der Auswertung der Sprungantworten wird auf die Wahl des Prozessmodells näher eingegangen und

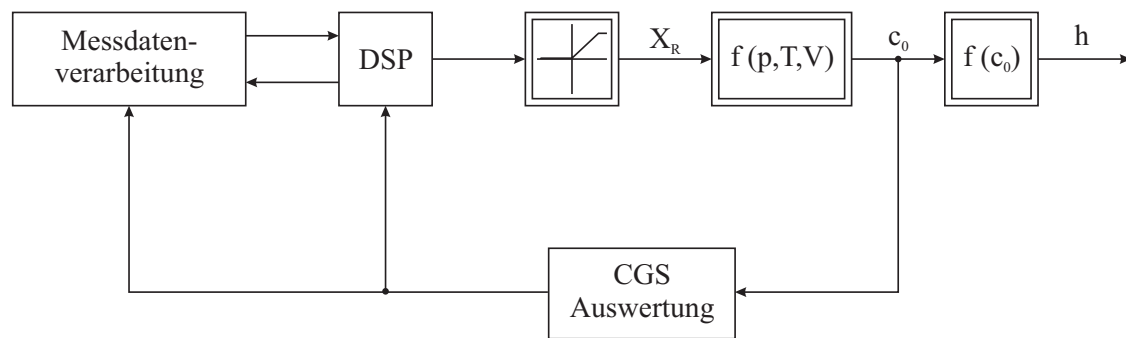


Bild 3.30: Blockschaltbild nach dem Umbau mit DSP und Einspritzdüse

die Parameter werden bestimmt.

Durch die Erweiterung und den Umbau des Laborgerätes muss die in Abschnitt 3.2.1 bestimmte Modellstruktur entweder bestätigt oder ersetzt werden. Für die Einbringung der Luft mit Hilfe eines linearen Drosselventils hat sich eine sprungförmige Anregung zur Identifizierung der Modellstruktur und des dazugehörigen Parametersatzes als geeignet erwiesen. Das Modell lässt sich als PT_1 -System mit einer Totzeit angeben, daher wird auch bei diesem Aufbau dieser Identifikationsansatz gewählt. Ausgehend von der ursprünglichen Anlage und den Modifikationen ergibt sich somit das in Bild 3.30 dargestellte System.

Der für die Messdatenverarbeitung verwendete PC sammelt die Messgrößen aller beteiligten Komponenten und erzeugt die Sollwertvorgabe für den DSP. Dieser kann entweder die Identifikation oder die Regelung des Luftgehaltes durchführen. Das System kann wie schon in Abschnitt 3.2.1 allgemein mit Gleichung 3.1 angegeben werden.

Die Kopplung zwischen der Drehzahl und dem in der Rohrleitung herrschenden Druck ist offensichtlich. Weiterhin wird festgestellt, dass mit steigendem Streckendruck auch der gemessene Luftgehalt steigt, obwohl die eingespritzte Luftmenge konstant gehalten wird. Bild 3.31 belegt die Kopplung zwischen Druck und Luftgehalt.

Im weiteren wird die Drehzahl vorgegeben und der Druck mittels eines Drosselventils manuell gestellt. Die Temperaturregelung für den Hydraulikkreislauf erfolgt nach wie vor extern. Die Temperaturschwankungen werden vernachlässigt und es ergibt sich der vereinfachte Zusammenhang nach Gleichung 3.2.

Da sich die Öleigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur ändern, und da sich das Einbringen von Luft mit großem Temperaturunterschied negativ auf die Öltemperatur auswirkt und somit die Öleigenschaften beeinflusst, muss die Luft annähernd die gleiche Temperatur wie das Öl besitzen. Die Neuerung besteht in der Temperierung der Luft auf die

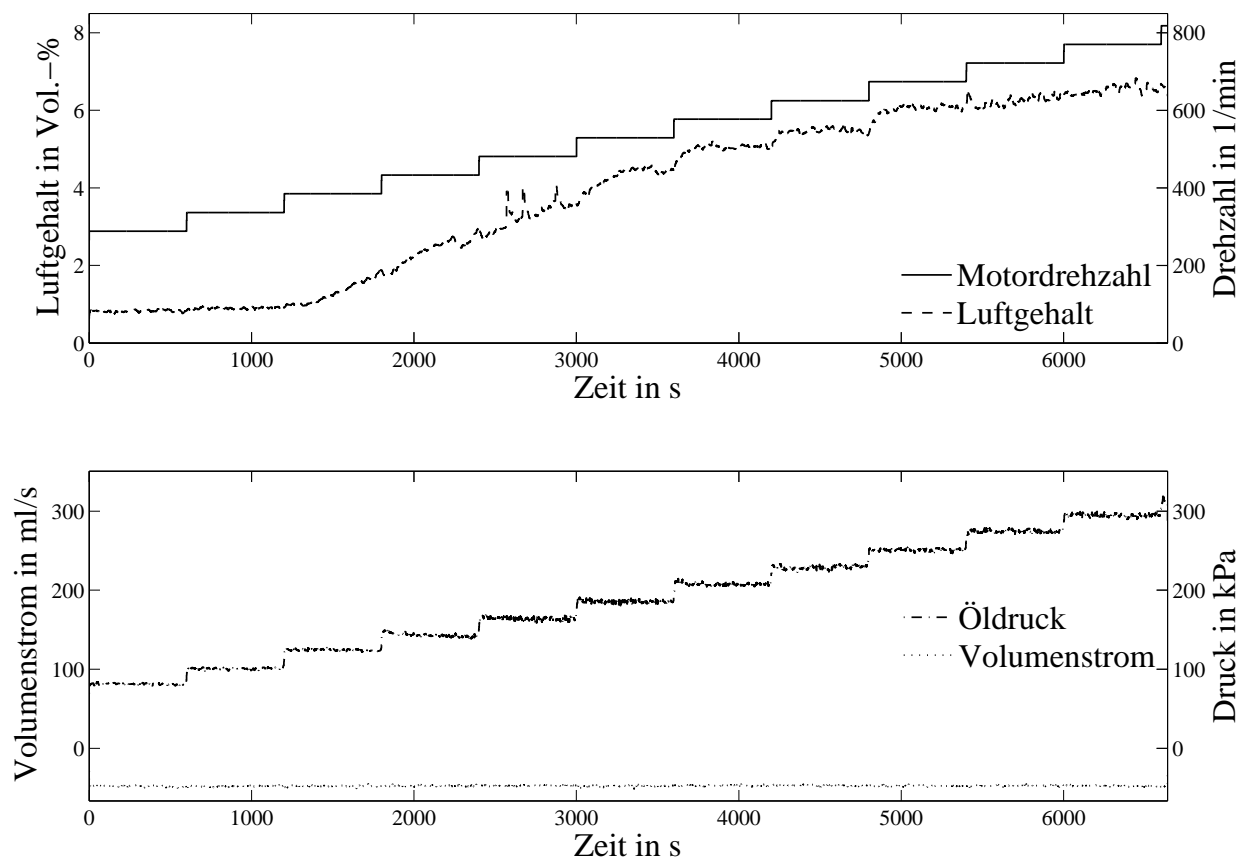


Bild 3.31: Kopplungseffekte von Streckendruck und Luftgehalt

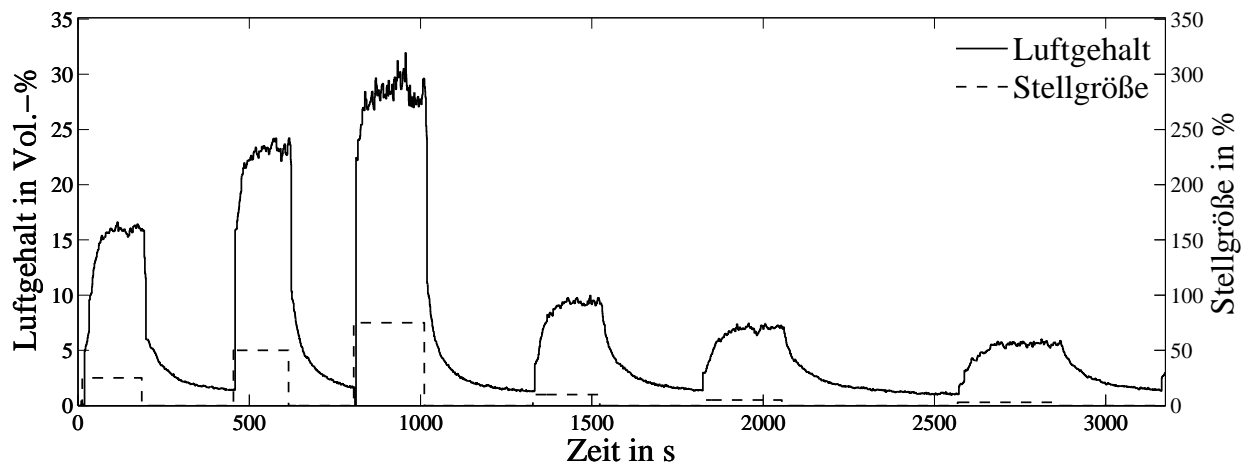


Bild 3.32: Kurzer Identifikationsablauf

Öltemperatur durch ein externes Wasserbad, bevor diese ins Öl eingebracht wird.

Bild 3.32 zeigt die Sprungantwort eines Öls für aufeinanderfolgende unterschiedliche Anregungsamplituden. Erkennbar ist ein bleibender Offset im Luftgehalt, nachdem keine Luft mehr eingebracht worden ist und ein Teil der Luft aus dem Öl ausgetreten ist.

Um den Offset nicht als Streckenparameter zu identifizieren, wird für die Identifikation eine zufällige Folge von Sprunganregungen genutzt [Kle03]. Diese Folge ist einmalig aufgrund von Zufallswerten erzeugt worden und wird für alle Identifikationen verwendet.

Der Verlauf einer erwarteten Identifikation ist in Bild 3.33 abgebildet. Bei einer Identifikationsdauer von $t_{ident} = 24\,000\text{ s}$ ($= 7\text{ h}$) zu einer Verschäumungsdauer von $t_{prüf} = 900\text{ s}$ fällt die Kosten–Nutzen–Analyse negativ aus. Sporadisch auftretende Messfehler oder Fehlfunktionen wirken sich zusätzlich negativ auf die Kosten–Nutzen–Analyse aus, da in diesem Fall die gesamte Identifikation wiederholt werden muss. Ferner braucht das Öl circa zwei bis drei Stunden, um die eingebrachte Luft abzugeben und seinen Gleichgewichtszustand zu erreichen.

Der Identifikationsablauf lässt sich zeitlich nicht verkürzen, da sich für jede Anregung ein konstanter Luftgehalt einstellen muss. In der Erprobung hat sich eine minimale Dauer pro Anregung–Ausgasen–Folge von $t = 2400\text{ s}$ ($= 40\text{ min}$) bewährt. Wird die Zeit zu kurz gewählt, lässt sich keine Aussage über das Verhalten des Luftgehaltes treffen. Die Identifikation ist in diesem Fall unbrauchbar und muss mit einer geeigneten Zeitvorgabe wiederholt werden.

Im Anschluss an einen Identifikationsablauf müssen die Modellparameter bestimmt werden.

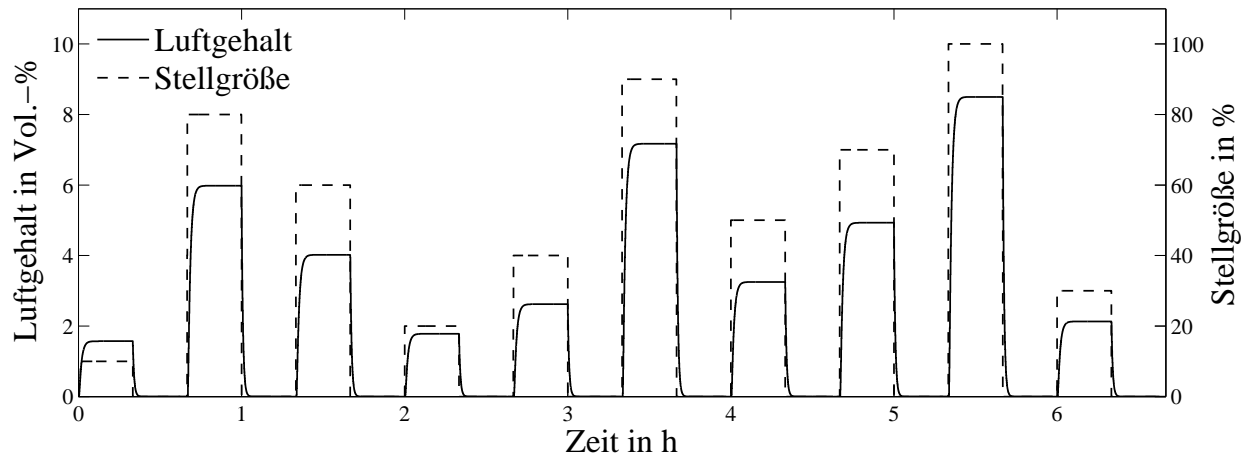


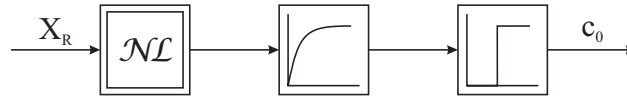
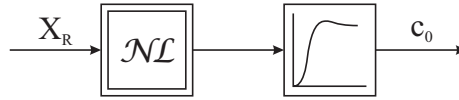
Bild 3.33: Erwarteter Luftgehalt für eine Identifikation

Die oben genannten Wiener–Hammerstein–Modelle werden auf das Laborgerät übertragen. Dabei wird das System $F(s)$ als eine Kombination aus einer Totzeit und einem PT_1 –System oder als PT_2 –System angenommen, denen jeweils eine nichtlineare Funktion \mathcal{NL} vorgeschaltet ist. Die Anordnung ist in Bild 3.25 dargestellt. Dabei wird ausgehend von der Stellgröße X_R der Luftgehalt c_0 bestimmt. Für die Beschreibung des Systems durch eine Kombination aus PT_1 –Glieder und Totzeit wird die Totzeit des Systems für alle Anregungen als konstant angenommen. Die Nichtlinearität und das PT_1 –Glieder beschreiben die Luftaufnahme des zu vermessenden Öls. Eine andere Modellstruktur ist in Bild 3.29 abgebildet. Die Totzeit und das PT_1 –Glieder beschreiben das Luftaufnahmeverhalten des Systems, die Nichtlinearität wird hier als Ausgaskoeffizient aufgefasst und beschreibt somit die Rückwirkung des aktuellen Luftgehaltes auf das System.

Die beiden gewählten Modellansätze sind zur Reglerauslegung genutzt worden und haben sich bewährt. Die Reglerauslegung gestaltet sich in Bezug auf die in Tabelle 3.2 festgelegten Anforderungen schwierig. Der Aufbau der Schaumsäule ist für die Regelung des Luftgehaltes nicht online verfügbar, so dass bei der Auslegung von Erfahrungswerten ausgegangen wird, die durch einen Iterationsprozess optimiert werden.

Für die Reglerauslegung wird angenommen, dass es sich um ein lineares System handelt. Ausgehend vom linearisierten Modell als PT_1 –Totzeit–System oder als PT_2 –System werden die Reglerparameter bestimmt, im Betrieb getestet und optimiert.

Bei einer Auslegung des Reglers mit Dämpfungsvorgabe, kann durch eine starke Dämpfung versucht werden, das Überschwingverhalten zu unterdrücken. Da das Ölverhalten im Voraus nicht bekannt ist und zusätzlich der Schaumaufbau während eines Prüfabschnittes nicht

Bild 3.34: Nichtlineare Modellstruktur mit PT₁-Glieder und TotzeitBild 3.35: Nichtlineare Modellstruktur mit PT₂-Glieder

messbar ist, lässt sich eine optimale Dämpfung des Systems nicht angeben. Ausgehend von den Hammerstein-Prozessmodellen aus den Bildern 3.34 und 3.35 werden alle Sprungantworten einzeln betrachtet und die Systemparameter dafür bestimmt. Anschließend wird das Gesamtmodell aus den identifizierten Teilsystemen gebildet. Bei der Identifikation der Teilsysteme wird von einem linearen Zusammenhang ausgegangen, die Nichtlinearität verknüpft die einzelnen Teilsysteme zu einem komplexen Gesamtsystem. Das lineare Teilsystem lässt sich mit einem PT₁-Totzeit-Modell dabei angeben durch:

$$G_1(s) = \frac{V_s}{T_s s + 1} \cdot e^{-T_T s} \quad (3.7)$$

Analog dazu lässt sich das lineare Teilsystem mit einem PT₂-Glieder beschreiben zu:

$$G_2(s) = \frac{V_s}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (3.8)$$

Als vorteilhaft bei der Annäherung des Systems durch ein PT₁-Totzeit-Modell erweist sich die bessere Berücksichtigung der Phasendrehung, wohingegen bei der PT₂-Annäherung das Schwingverhalten besser approximiert werden kann.

Am Beispiel einer Sprungantwort aus Bild 3.36 wird das System betrachtet. Dazu wird ein Teilprozess des Systems identifiziert und die in den Gleichungen 3.7 und 3.8 angegebene Nichtlinearität \mathcal{NL} entfällt. Diese identifizierten Systeme lassen sich wie folgt angeben:

$$G_{1,ident}(s) = \frac{1,26}{220 s + 1} \cdot e^{-45 s}$$

und

$$G_{2,ident}(s) = \frac{1,209}{22520 s^2 + 210 s + 1}$$

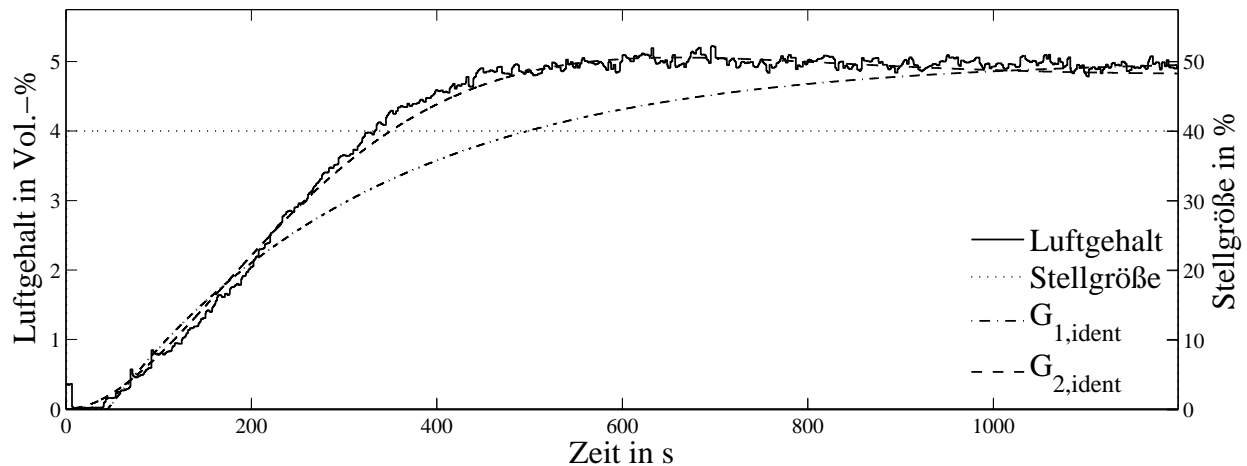
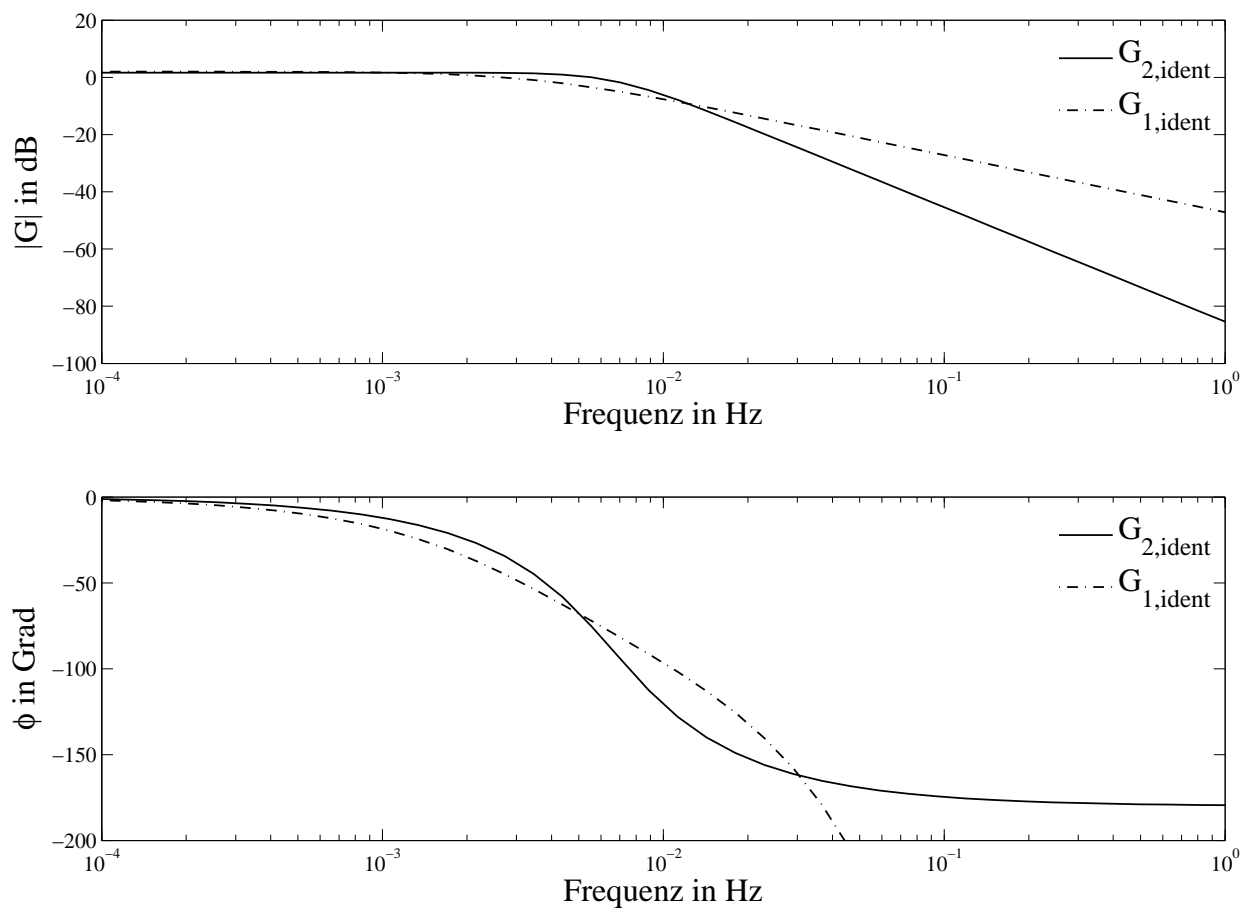


Bild 3.36: Vergleich der Antworten der Strecke und der Modelle

Die Sprungantwort für das PT_2 -Modell stimmt gut mit dem realen System überein. Der Verlauf für die Annahme, dass es sich um ein PT_1 -Totzeit-System handle, stimmt sowohl für den Anfangsbereich bis circa $t = 200$ s als auch für den eingeschwungenen Zustand überein. Ansonsten weist die Modellantwort Abweichungen bis zu 1,5 Vol.-% auf. Ein Vergleich der beiden Übertragungsfunktionen ergibt, dass beide Modelle sehr große Zeitkonstanten besitzen und somit eine geringe Dynamik. Die Betrags- und Phasenverläufe der Modelle sind in Bild 3.37 gegenübergestellt. Die Beträge weisen in beiden Modellen typische Verläufe auf: Beim PT_1 -Modell beträgt die Steigung ab der Eckfrequenz -20 dB/Dekade und beim PT_2 -System -40 dB/Dekade. Im Phasenverlauf ist das PT_2 -System eindeutig erkennbar, der Verlauf für das PT_1 -Totzeit-System hingegen wird von der Totzeit dominiert, die Phasenabsenkung des PT_1 -Glieds ist nicht eindeutig ersichtlich.

Bild 3.37: Vergleich des PT_1 -Totzeit-Modells mit dem PT_2 -Modell

3.2.6 Einsatz von Beobachtern

Nachdem im Abschnitt 3.2.5 das zu regelnde System und die Parameterbestimmung betrachtet worden sind, wird im folgenden auf den Einsatz von Beobachtern zur Regelung und Messwertaufbereitung eingegangen. Beobachter [Föl94, Lun02] kommen immer dann zum Einsatz, wenn aus den Messgrößen die nicht messbaren Zustandsgrößen des Systems, zum Beispiel für einen Zustandsregler, rekonstruiert werden müssen. Dazu wird dem realen Prozess das Modell parallel geschaltet und mit dem gleichen Signal beaufschlagt. Bild 3.38 zeigt das reale System mit dem parallel geschalteten Modell.

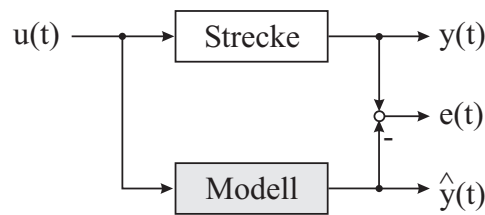


Bild 3.38: Strecke mit parallelem Modell

Wenn das Modell mit dem System übereinstimmt und stabil ist, wird es bei gleichen Anfangsbedingungen auch das gleiche Ergebnis liefern. Der Fehler $\underline{e}(t)$ wird für $t \rightarrow \infty$ gegen Null streben. Da zum einen die Anfangsbedingungen selten identisch sind, zum anderen auf reale Prozesse immer Störungen wirken, die Einfluss auf die Zustandsgrößen \underline{x} des Systems, aber nicht auf die $\hat{\underline{x}}$ des Modells nehmen, sind $\underline{y}(t)$ und $\hat{\underline{y}}(t)$ voneinander verschieden und es bleibt eine Differenz $\underline{y}(t) - \hat{\underline{y}}(t)$. Führt man den Fehler $\underline{e}(t)$ über eine geeignete Matrix \underline{L} dem Modell zu und beeinflusst es dadurch, so erhält man den 1964 von LUENBERGER vorgeschlagenen Beobachter, dargestellt in Bild 3.39.

$$\tilde{\underline{x}} = \underline{x} - \hat{\underline{x}} \quad (3.9)$$

Daher wird über die Rückführungsmatrix \underline{L} die Pollage eingestellt und damit das Einschwingverhalten vorgegeben. Die Zustandsdifferentialgleichung des Beobachters lässt sich aus Bild 3.39 wie folgt zusammenfassen:

$$\dot{\hat{\underline{x}}} = (\underline{A} - \underline{L} \underline{C}) \hat{\underline{x}} + \underline{B} \underline{u} + \underline{L} \underline{y} \quad (3.10)$$

Aus der Gleichung (3.9) für den Schätzfehler und die Zustandsdifferentialgleichung (3.10) des Beobachters folgt:

$$\dot{\tilde{\underline{x}}} = (\underline{A} - \underline{L} \underline{C}) \tilde{\underline{x}} \quad (3.11)$$

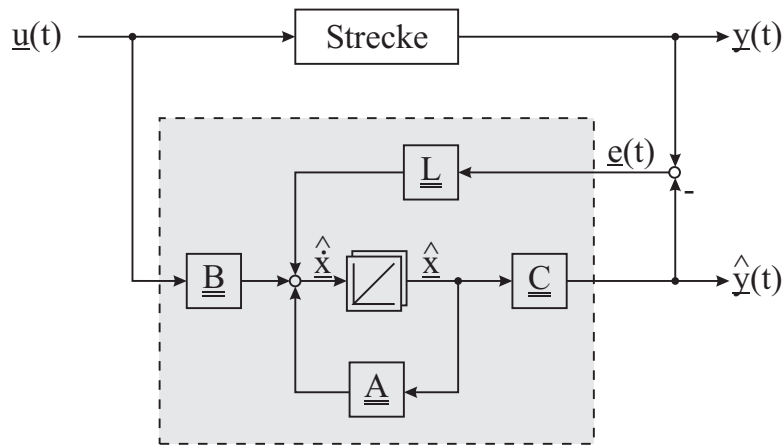


Bild 3.39: Luenberger Beobachter

Damit der Schätzfehler für alle Anfangsbedingungen gegen Null konvergiert, müssen die Eigenwerte der Matrix $(\underline{A} - \underline{L} \underline{C})$ durch eine geeignete Parameterwahl von \underline{L} einen negativen Realteil besitzen. Damit konvergiert der Ausgangsfehler zu Null.

Bei der bisherigen Betrachtung ist der Einfluss einer Störung \underline{d} vernachlässigt worden, Störungen führen zu prinzipbedingten Schätzfehlern. Soll nun dieses Signal durch den Beobachter mitgeschätzt werden, so muss es entweder direkt messbar oder aus den Stell- und Messwerten rekonstruierbar sein. Die bekannte Struktur des Luenberger Beobachters wird um das Störgrößenmodell (Bild 3.40) erweitert. Bei einer messbaren Störung liegt das Störmodell vor, ansonsten muss eine für die Störung passende Modellstruktur gewählt werden. Dabei lassen sich die Zustandsdifferentialgleichungen des Störmodells wie folgt angeben:

$$\dot{\hat{\underline{x}}_D} = \underline{A}_D \hat{\underline{x}}_D - \underline{H}_D e \quad (3.12)$$

$$\hat{\underline{y}}_D = \underline{C}_D \hat{\underline{x}}_D \quad (3.13)$$

Der Ausgangsvektor $\hat{\underline{y}}_D$ beschreibt dann näherungsweise die realen Störungen, die auf die Strecke wirken, und wird als zusätzlicher Eingangsvektor dem Beobachter zugeführt. Für den Störgrößenbeobachter ergeben sich dann folgende Differentialgleichungen:

$$\dot{\hat{\underline{x}}} = \underline{A} \hat{\underline{x}} + \underline{C}_D \hat{\underline{x}}_D + \underline{B} \underline{u} \quad (3.14)$$

$$\dot{\hat{\underline{x}}_D} = \underline{A}_D \hat{\underline{x}}_D \quad (3.15)$$

$$\hat{\underline{y}} = \underline{C} \hat{\underline{x}} \quad (3.16)$$

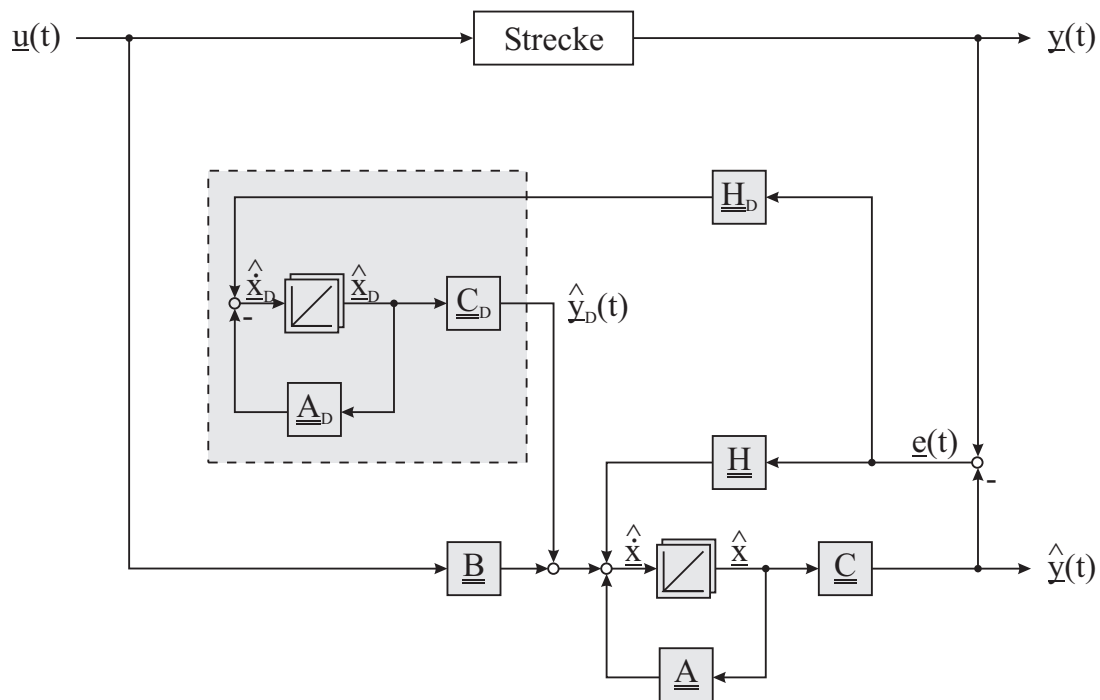


Bild 3.40: Störbeobachter

Oder in Matrizenform geschrieben:

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}} \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{\underline{\mathbf{A}}} & \underline{\underline{\mathbf{C}}}_D \\ \underline{\underline{\mathbf{0}}} & \underline{\underline{\mathbf{A}}}_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{x}}_D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{\underline{\mathbf{H}}} \\ \underline{\underline{\mathbf{H}}}_D \end{pmatrix} \underline{\underline{\mathbf{e}}} + \begin{pmatrix} \underline{\underline{\mathbf{B}}} \\ \underline{\underline{\mathbf{0}}} \end{pmatrix} \underline{\underline{\mathbf{u}}}$$

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{y}} \\ \hat{\mathbf{y}}_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{\underline{\mathbf{C}}} & \underline{\underline{\mathbf{0}}} \\ \underline{\underline{\mathbf{0}}} & \underline{\underline{\mathbf{C}}}_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{x}}_D \end{pmatrix}$$

Der in Bild 3.40 dargestellte Beobachter wird nicht ausschließlich für die Schätzung der Zustandsgrößen $\underline{\mathbf{x}}$, sondern auch für die Filterung des Luftgehaltes eingesetzt. Dadurch, dass der Luftgehalt mit einer Frequenz von $f = 1$ Hz bestimmt wird, wirken sich Messfehler auf die Luftgehaltsregelung und somit auf den Schaumaufbau aus. Durch das Abstützen der Regelung auf den geschätzten Luftgehalt sollen diese Einflüsse minimiert werden.

Selbst beim Vorbereiten (Temperieren) des Öls für eine Messreihe ist ein geringer Luftgehalt gemessen worden, obwohl noch keine Luft eingebracht worden ist. Ursachen dafür können in der Messsystematik und den Öleigenschaften liegen. Da sich der Luftgehalt langsam geändert hat, ist ein Störgrößenmodell mit reinem I-Anteil gewählt worden, um diesen Effekt zu minimieren.

3.2.7 Regelung des Systems mit Einspritzdüse

In den vorangegangenen Abschnitten 3.2.5 und 3.2.6 ist auf das Streckenmodell und auf zwei Beobachterstrukturen eingegangen worden. Im Weiteren werden die Regelung und die mit der Einspritzdüse erzielten Ergebnisse betrachtet.

Bei der Auslegung der Regler ist von einem linearisierten Modell für den Arbeitspunkt ausgegangen worden. Auf die Berechnungen der einzelnen Regler für das jeweilige Öl wird an dieser Stelle bewusst verzichtet, da eine Reglerauslegung für eine PT_2 -Strecke oder ein PT_1 -Totzeit-System in der Literatur [Lun01, Föl94] hinreichend beschrieben ist. Bei Verwendung der Youla-Parametrierung wird von einem linearisierten Modell mit PT_1 -Struktur für das System ausgegangen, die detaillierte Berechnung ist in [Mül96] zu finden.

Ausgehend von den in Kapitel 3.2 formulierten Anforderungen an die Regelung, werden die Ergebnisse vorgestellt und bewertet. Die Anlage aus Abschnitt 3.2 unterscheidet sich von dieser in Hinblick auf den Lufteinlass und die Regelung. Der Schaumhöhenverlauf wird während des Messablaufs ermittelt und steht erst im Anschluss zur Verfügung. Die an die Regelung gestellten Anforderungen können Tabelle 3.1 auf Seite 28 entnommen werden.

Guter Schaumaufbau

Von den folgenden beiden Regelungen ist die eine mit einem Beobachter und die andere mit einer Tiefpassglättung des Luftgehaltes realisiert. Bild 3.41 zeigt den Verlauf des Luftgehaltes für die Strecke und das Modell, sowie die aufgebaute Schaumhöhe. Für den Beobachter ist das linearisierte Streckenmodell um den Arbeitspunkt verwendet worden. Für den eingeschwungenen Zustand beim Luftgehalt von 5 Vol.-% stimmt das Modell mit der Strecke überein. Die Abweichungen zwischen beobachtetem und gemessenem Luftgehalt für $t \leq 300$ s sind auf den hydraulischen Kreislauf und die Fehlanpassung des Modells zurückzuführen.

Sowohl die Abweichungen des Luftgehaltes als auch der Schaumaufbau erfüllen die Kriterien und die Regelung kann als gut eingestuft werden.

Der Luftgehaltsverlauf mit Tiefpassglättung ist in Bild 3.42a abgebildet. Der Luftgehalt liegt bei dieser Messung im Toleranzbereich und der Aufbau der Schaumsäule ist gut. Die Messspitze bei $t = 17$ s kann auf das in Abschnitt 3.2.2 Seite 42 f. beschriebene Phänomen zurückgeführt werden: Eine vom Luft-Öl-Gemisch mitgerissene Luftblase sorgt für einen momentanen Anstieg des gemessenen Luftgehaltes. Wie Bild 3.42b zeigt, bleibt dieses jedoch ohne Auswirkungen auf die Schaumsäule. Diese Regelung kann ebenfalls als gut bewertet werden.

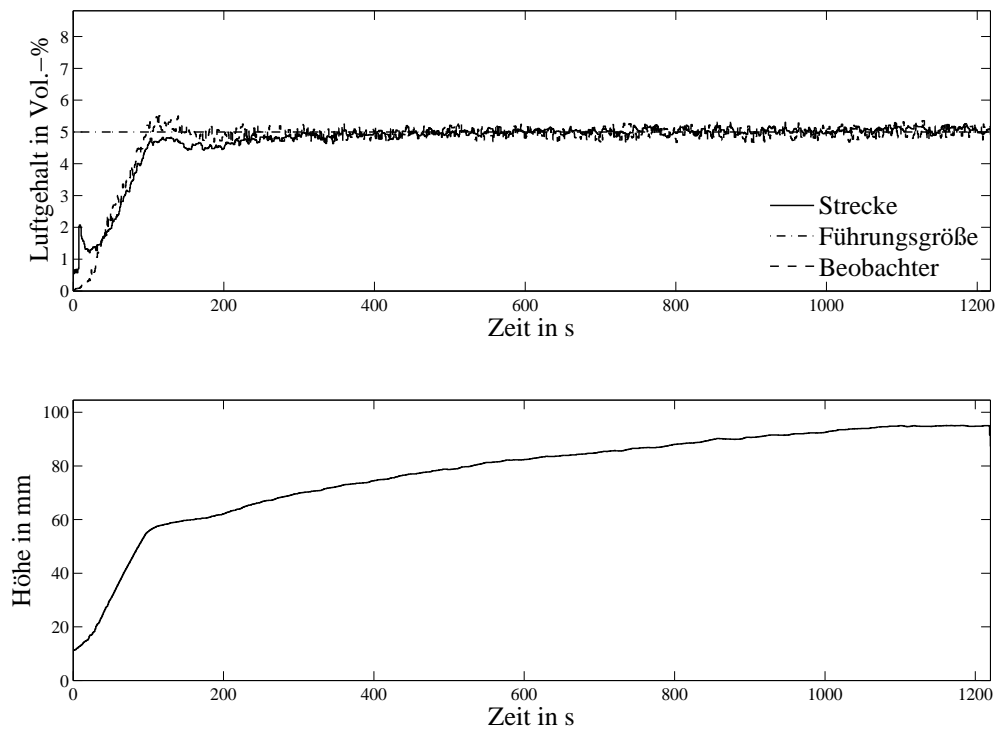


Bild 3.41: Beobachtergestützte Regelung

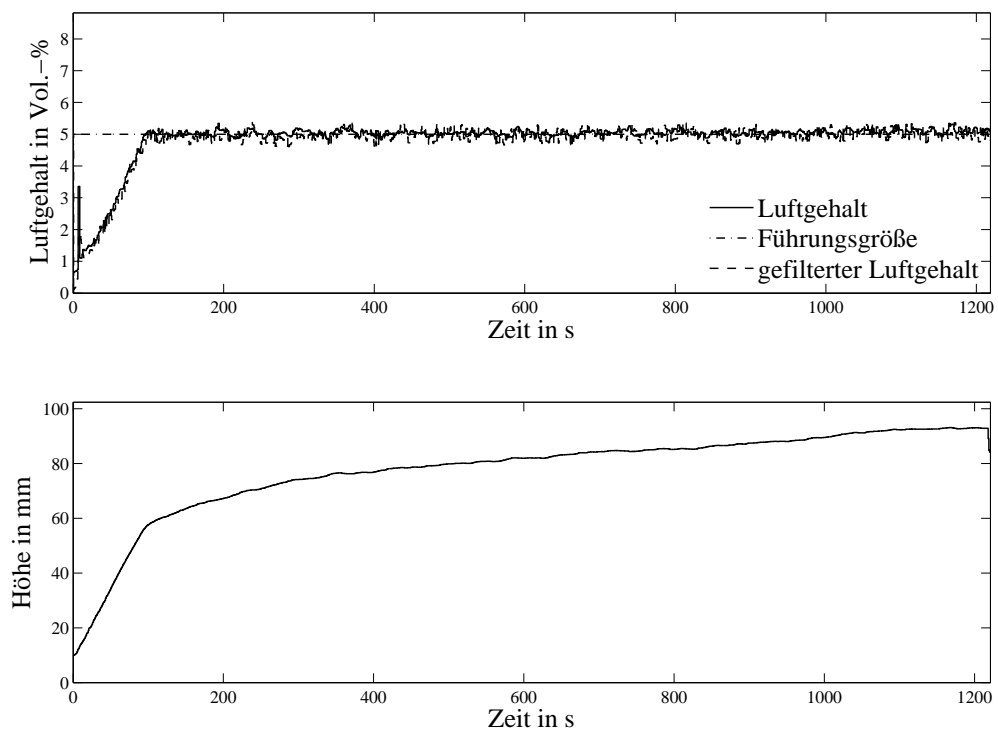


Bild 3.42: Messdatenaufbereitung mit Tiefpassfilter

Akzeptabler Schaumaufbau

Bei den folgenden vier Messungen werden nicht alle Kriterien erfüllt. Die Verläufe der Luftgehalte und der Schaumhöhen sind in Bild 3.43 dargestellt. Bei allen Messungen weisen die Luftgehalte ein gutes Einschwingverhalten mit geringer Überschwingweite auf. Die Abweichungen der Luftgehalte sind über den gesamten Messzeitraum größer als die geforderten 0,5 Vol.-%. Weiterhin sind zwei Ausreißer bei verschiedenen Messungen im Luftgehalt erkennbar. Diese beeinflussen den jeweiligen Höhenverlauf. Grund dafür kann eine Luftblase und die Regelung sein.

Die vier dargestellten Messungen zeigen, dass sich bei gleichem Luftgehaltsverlauf der gleiche Schaumaufbau erreichen lässt. Die Erzeugung des Schaumes ist reproduzierbar. Da sich eine konstante Schaumsäule ausbildet und der Luftgehalt den Toleranzbereich nicht gravierend verlässt, wird diese Regelung als akzeptabel bewertet.

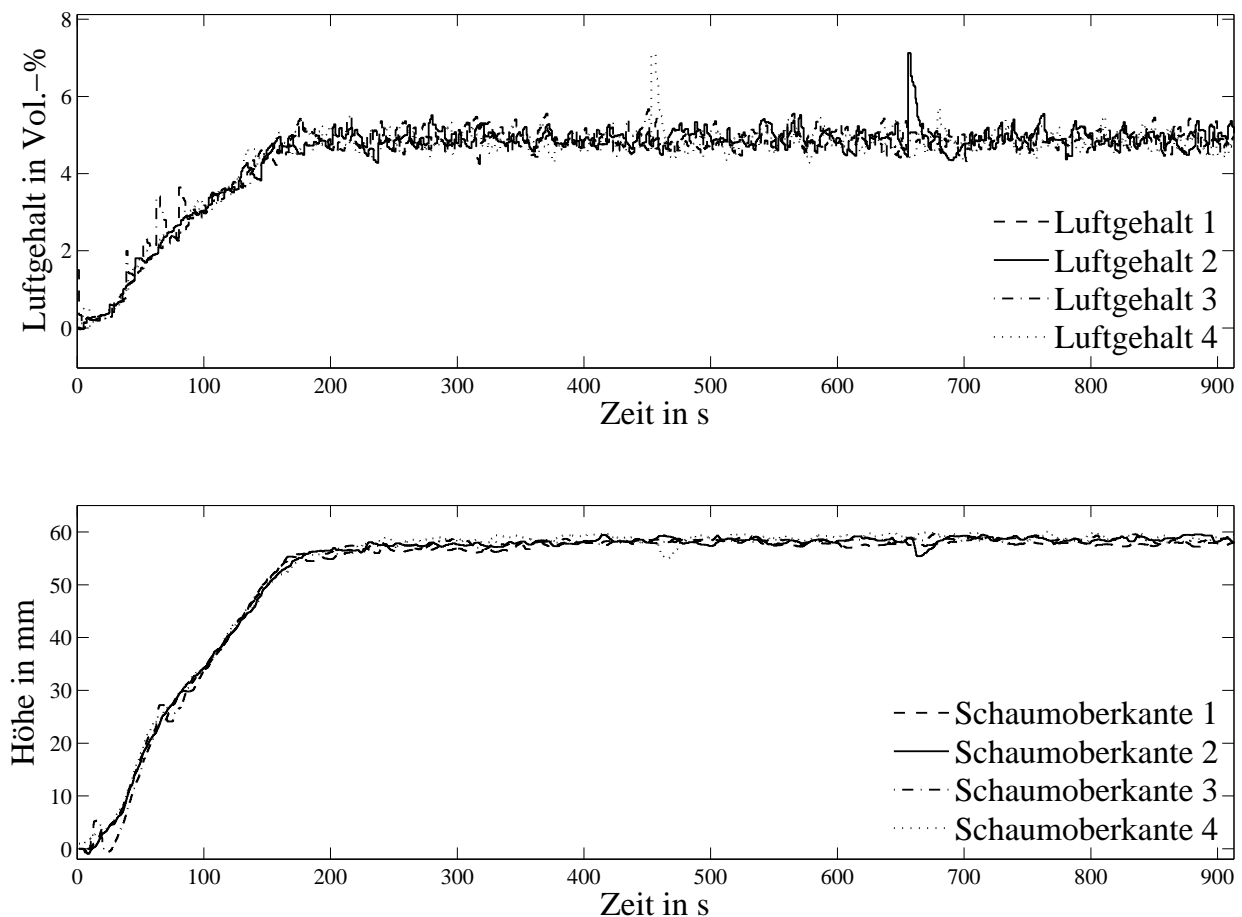


Bild 3.43: Vergleich verschiedener Messreihen eines Öls

Schlechter Schaumaufbau

Die im Folgenden dargestellten Messreihen lassen sich nicht zur Beurteilung des Luftabscheidevermögens von Ölen heranziehen, weil entweder die Schaumhöhe nicht monoton steigt oder die Kriterien an die Regelung nicht eingehalten werden. Sind entweder die Anforderungen an die Luftgehaltsregelung oder an den Schaumaufbau verletzt, so wird das Gesamtergebnis als schlecht bewertet.

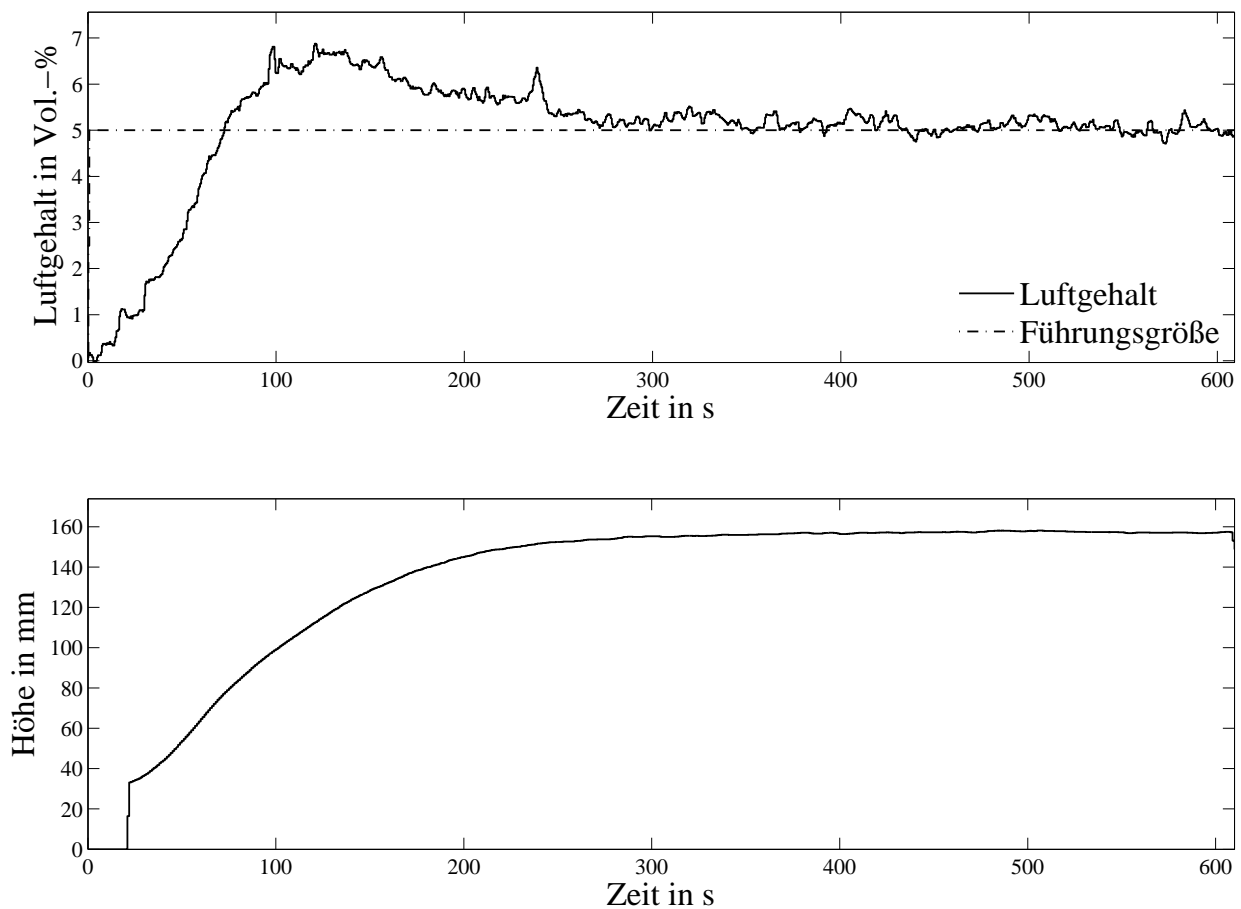


Bild 3.44: Geforderte Einschwingdauer wird bei sprungförmiger Anregung überschritten

In Bild 3.44 ist der Verlauf des Luftgehaltes dargestellt. Nach einer Dauer von circa $t = 270$ s ist der Luftgehalt eingeschwungen und verlässt den Toleranzbereich nicht mehr. Damit ist das Kriterium der Einschwingdauer von $t \leq 180$ s verletzt. Hinzu kommt, dass die Überschwingweite mit 2 Vol.-% deutlich über den geforderten 0,5 Vol.-% liegt. Die Regelung ist somit als schlecht zu bewerten.

Der Höhenverlauf einer den Vorgaben entsprechenden Schaumsäule ist ebenfalls in Bild 3.44

dargestellt. Durch die gravierenden Abweichungen des Luftgehaltes ist von einem verfälschten Ergebnis des Schaumaufbaus auszugehen und die Messung zu wiederholen.

Wenn eine Optimierung der Parameter keine Verbesserung bezüglich des Einschwingverhaltens des Öls mit sich bringt, besteht eine weitere Möglichkeit darin, die Führungsgröße nicht sprungförmig vorzugeben, sondern durch einen Führungsgrößenfilter rampenförmig ansteigen zu lassen. Damit soll zum einen gewährleistet werden, dass die Überschwingweite den Vorgaben entspricht, und zum anderen, dass die Einschwingdauer $t = 180\text{ s}$ eingehalten wird.

Eine Messreihe mit einer rampenförmigen Führungsgrößenvorgabe ist in Bild 3.45 dargestellt. Die Einschwingdauer ist größer als bei der vorhergehenden Messung, ferner variiert der Luftgehalt wesentlich stärker. Für die Bestimmung des Luftabscheideverhaltens soll der Luftgehalt nach $t \geq 180\text{ s}$ auf 5 Vol.-% eingeschwungen sein. Durch den Einsatz eines Führungsgrößenfilters kann dieses bei diesem Öl nicht erreicht werden.

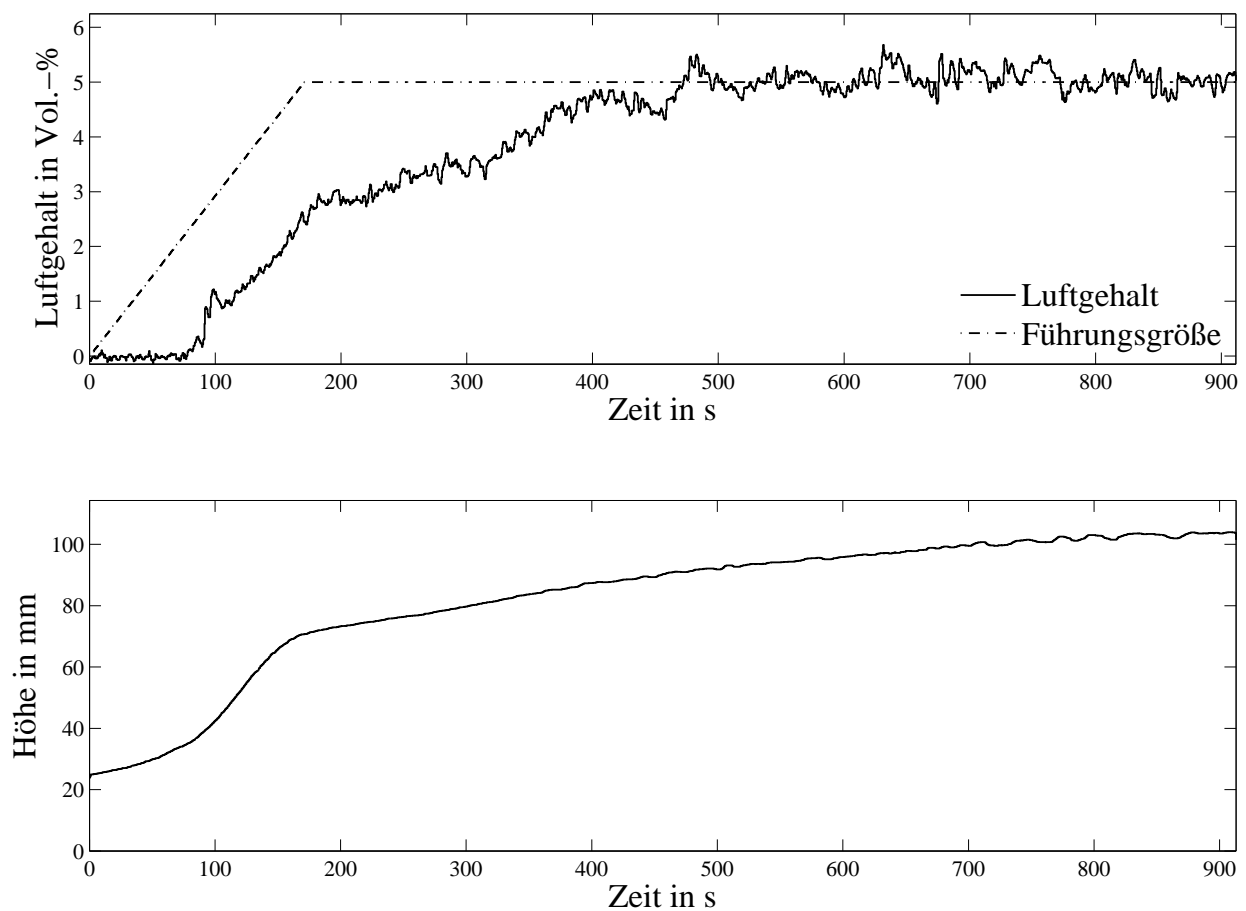


Bild 3.45: Überschreiten der geforderten Einschwingdauer bei rampenförmiger Anregung

Die folgende Gegenüberstellung zweier Messreihen soll die Unterschiede im Schaumaufbau verdeutlichen. Bei der ersten Messung erfolgt die Führungsgrößenvorgabe sprungförmig, bei der zweiten durch einen Führungsgrößenfilter rampenförmig. Dabei fällt auf, dass sich die Schaumsäule während der ersten Messung nach einem Überschwingen im Luftgehalt nicht weiter aufbaut, sondern wieder abnimmt. Ein Grund dafür kann sein, dass sich an der einmal benetzten Glasoberfläche später kein Schaum mehr anlagern kann. Zur Bestimmung des Luftabscheideverhaltens eines Öls muss die Innenfläche des Glaszylinders rein sein, damit sich der Schaum reproduzierbar aufbaut.

Bei der zweiten Messung bildet sich die Schaumsäule später aus. Da die Glasoberfläche rein ist, kann sich der Schaum dort optimal anlagern und eine höhere Säule bilden. In Bild 3.46 sind diese Verläufe für den gleichen Reglertyp mit unterschiedlicher Führungsgrößenvorgabe gegenübergestellt.

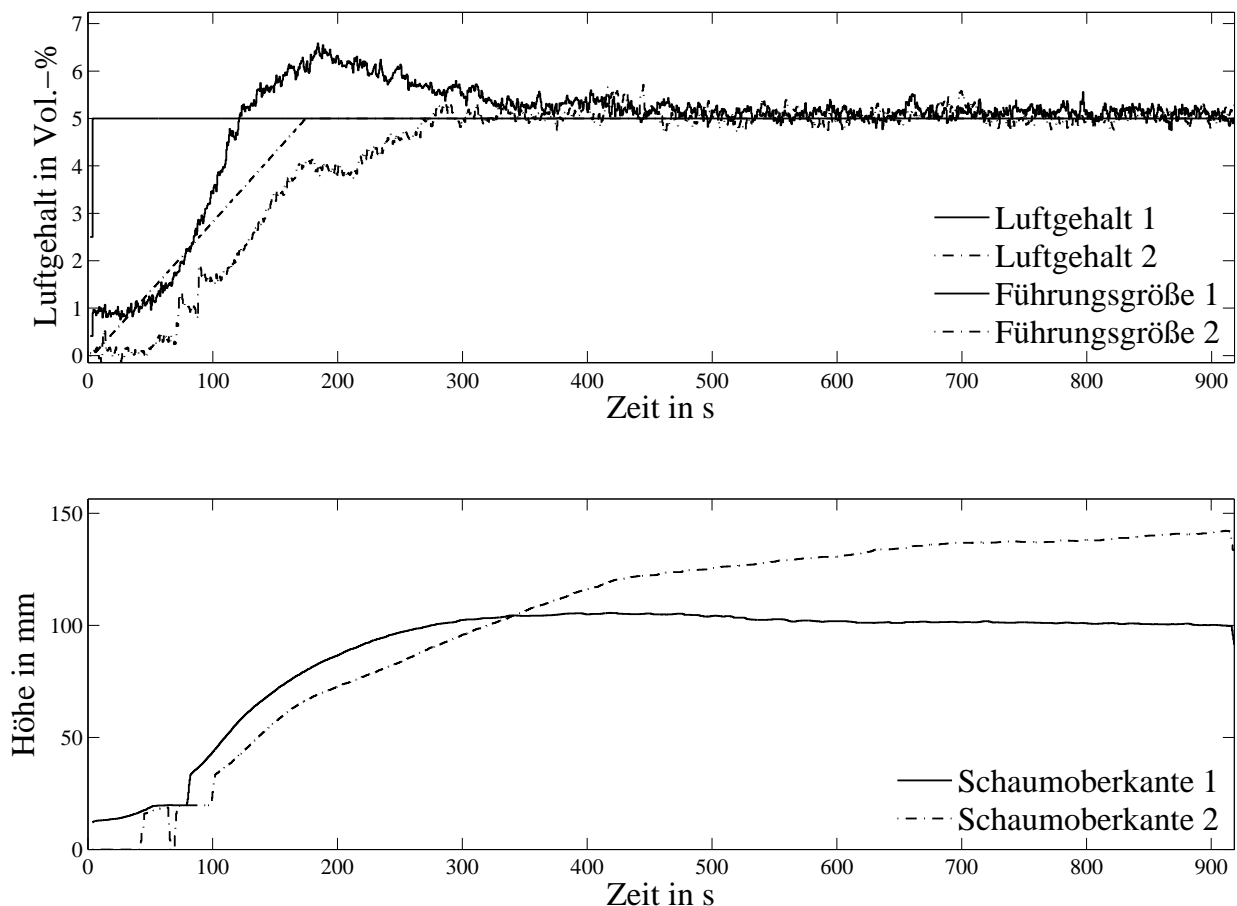


Bild 3.46: Schaumaufbau bei unterschiedlicher Führungsgrößenvorgabe

Im Folgenden wird eine Messreihe vorgestellt, bei der keine Regelung des Luftgehaltes mög-

lich gewesen ist. Bei dem zu vermessenden Öl vom Typ Gear ATF wird die Luft nicht gleichmäßig ins Öl eingebracht. In Bild 3.47 sind der Luftgehalt, die Stellgröße sowie die dazugehörige Höhe der Schaumsäule dargestellt.

Der Luftgehalt reagiert auf kleine Änderungen der Stellgröße verzögert und sprungförmig. Die Abweichungen überschreiten teilweise 2 Vol.-%. Einige Spitzen haben eine zeitlich Dauer von $t \geq 10$ s. Deshalb ist es unwahrscheinlich, dass sie durch einzelne große Luftblasen entstehen. Ferner lassen die zeitlichen Abstände dieser Spitzen keine Gesetzmäßigkeiten erkennen, so dass die Vermutung nahe liegt, dass das Öl die Luft nicht wie gewünscht aufnimmt. Aufgrund der vorhandenen Messdaten lässt sich die Ursache nicht mit Sicherheit bestimmen. Daraus resultiert letztendlich, dass der Luftgehalt dieses Öls mit der Anlage nicht geregelt werden kann.

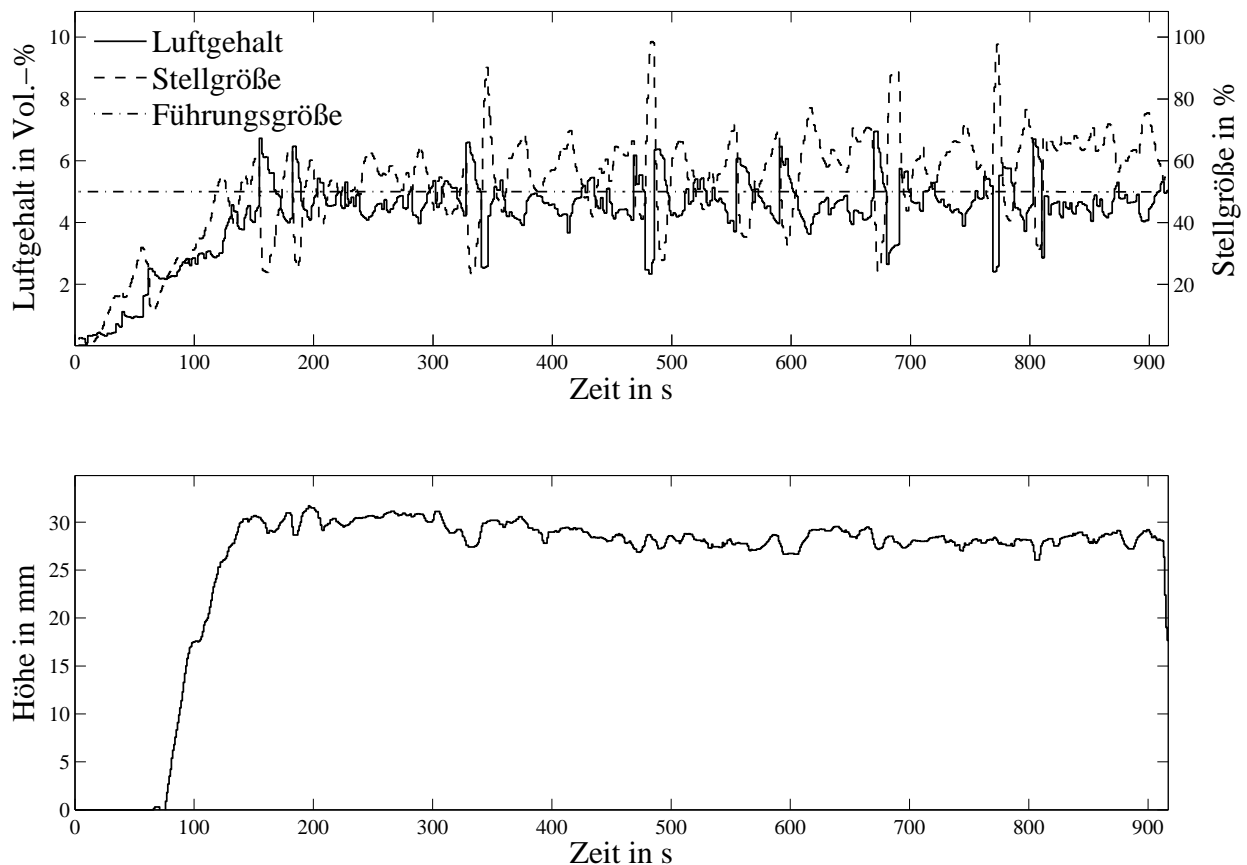


Bild 3.47: Luftgehalts- und Schaumhöhenverlauf eines nicht regelbaren Luftgehaltes

Fehler und ihre Ursachen

Die erläuterten Ergebnisse zur Luftgehaltsregelung und zum Schaumaufbau werfen die Frage auf, wieso zum einen der Luftgehalt bei einigen Ölen nicht regelbar ist und zum anderen die geforderten Kriterien ganz oder teilweise verletzt werden. Anhand einiger Beispiele werden die aufgetretenen Fehler beschrieben, mögliche Ursachen genannt und Lösungsansätze vorgestellt.

Zwei sehr häufig auftretende Fehler sind in Bild 3.48 dargestellt. Während der Luftgehaltszunahme ist eine kurze Spitze bei $t = 103\text{ s}$ zu erkennen. Ursache dafür ist meist eine Luftansammlung in Totvolumina des Hydraulikkreises, die sich löst und vom Luft-Öl-Gemisch mitgerissen wird. In anderen Fällen, hier nach $t = 327\text{ s}$, wird ein DT_1 -ähnlicher Verlauf detektiert.

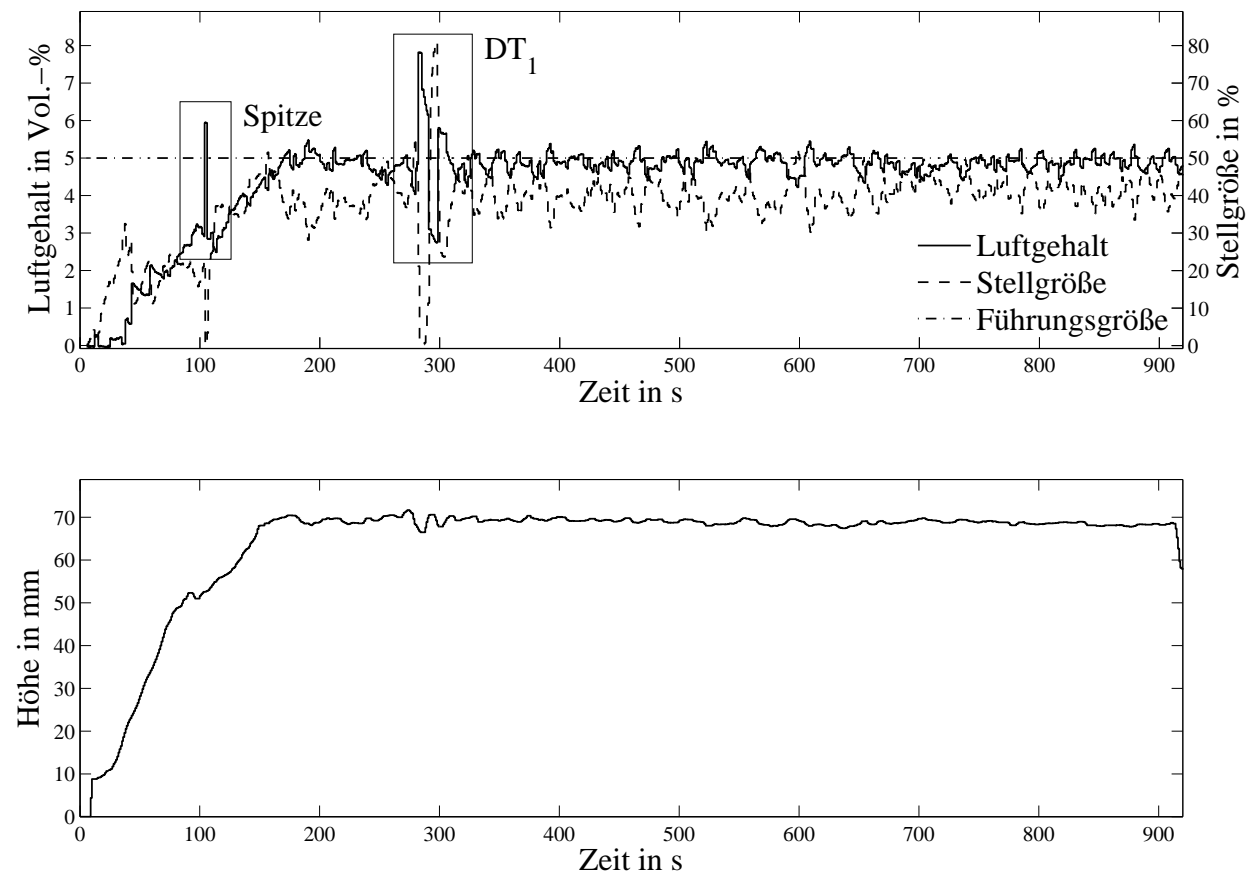


Bild 3.48: Zwei detektierte Fehler im Luftgehalt

Der Luftgehalt steigt sprunghaft an und erreicht nach circa $t = 25\text{ s}$ den ursprünglichen Wert. Ursache hierfür können ebenfalls Luftblasen sein.

Unabhängig davon, ob Luftblasen oder die Regelung verantwortlich für die beobachtete Reduzierung der Schaumhöhe sind, muss diese Messung wiederholt werden.

Die Folgen einer weiteren wenig offensichtlichen Fehlerquelle sind in Bild 3.49 dargestellt. Der Luftgehalt steigt zu Beginn der Messreihe an und ist nach circa $t = 200\text{ s}$ eingeschwungen. Ab diesem Zeitpunkt gleicht die Regelung lediglich die für den Schaumaufbau benötigte Luft aus, um die geforderten 5 Vol.-% einzuhalten. Die Stellgröße verringert sich über den Messzeitraum, bis sie zum Ende hin gegen Null konvergiert.

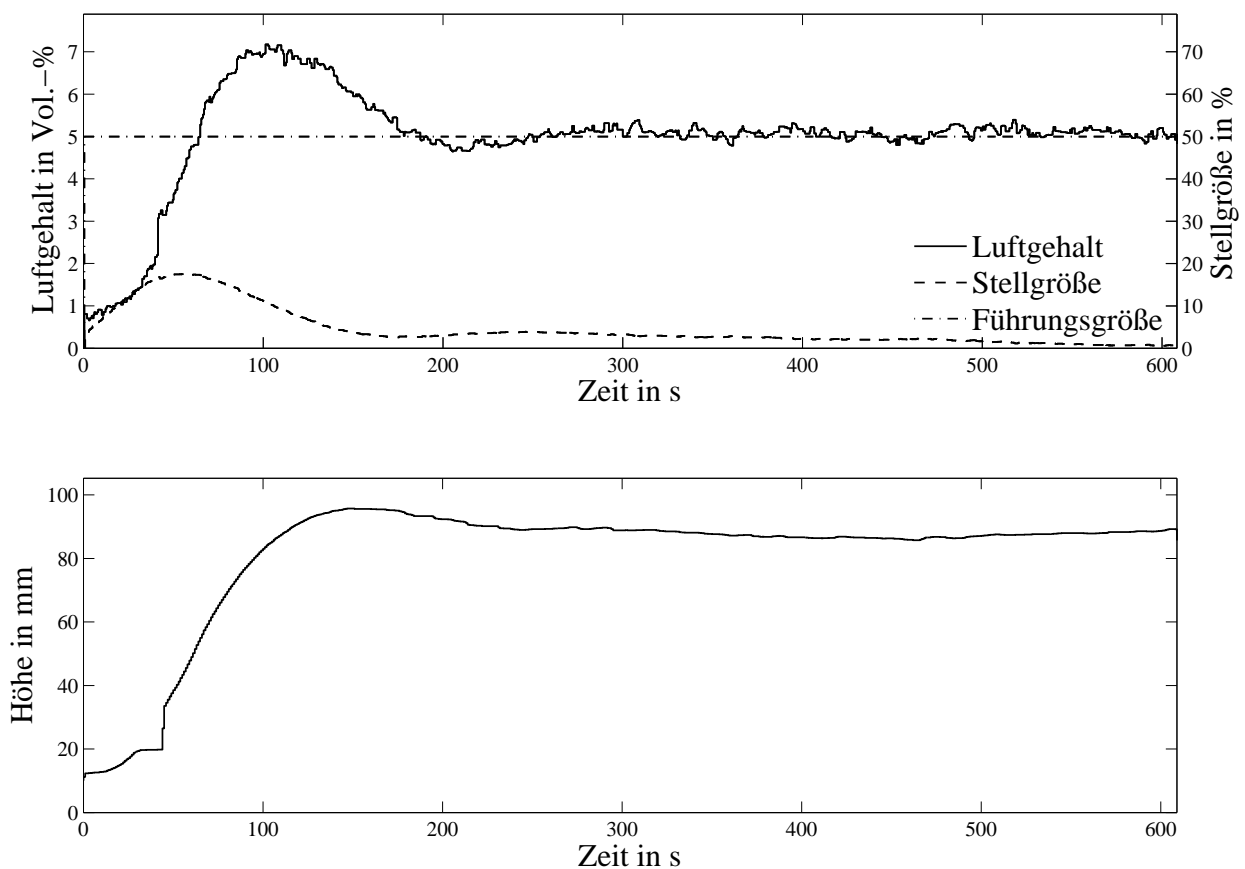


Bild 3.49: Luftgehalt und Schaumaufbau

Die Luft muss also auf anderem Wege in den Hydraulikkreis gelangen, als durch die Einspritzdüse. Weitere Messungen, bei denen keine Stellgröße vom DSP ausgegeben worden ist, der Luftgehalt aber über den geforderten 5 Vol.-% gelegen hat, bestätigten diese Vermutung.

Daher ist zur Kontrolle der Luftzweig entfernt und mit einem Stopfen abgeschlossen worden. Falls der Hydraulikkreis luftdicht verschraubt ist, dann kann der Luftgehalt über den gesamten Messzeitraum nicht steigen. In Bild 3.50 sind der Luftgehaltsverlauf und die Schaumbil-

ung über einen Zeitraum von $t = 250$ s protokolliert. Der in den ersten $t = 20$ s gemessene Luftgehalt ist auf beim Befüllen der Anlage eingeschlossene Luft zurückzuführen.

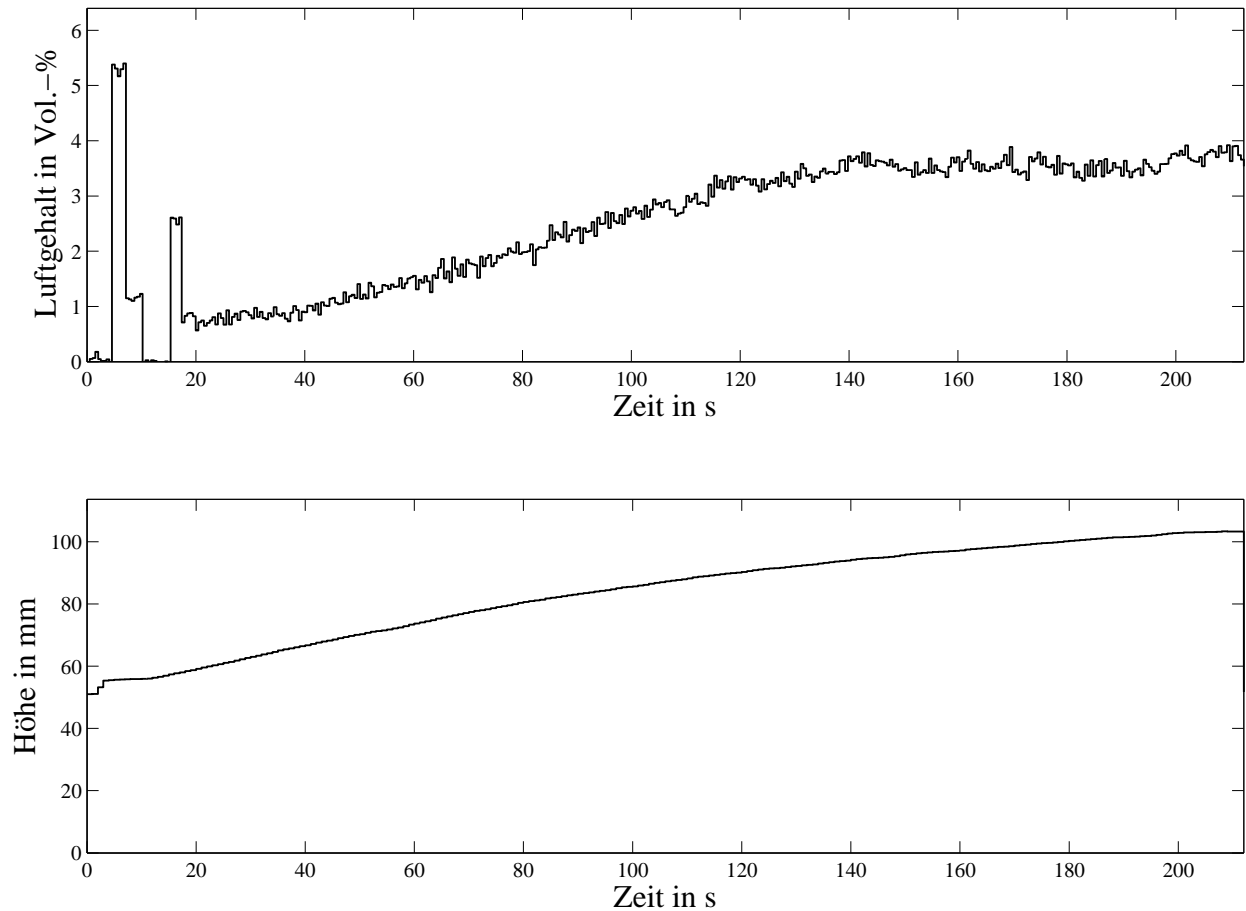


Bild 3.50: Verschlussstopfen: Luftgehalt und Schaumaufbau

Der im weiteren Verlauf ansteigende Luftgehalt kann nur auf Undichtigkeiten an den Verbindungsstellen zurückgeführt werden. Diese Leckagen lassen sich dadurch beheben, dass alle Verbindungsstellen im Hydraulikkreislauf nicht nur öldicht, sondern auch luftdicht ausgelegt werden. Um das angesammelte Luftvolumen im System zu vermeiden, dürfen sich keine Totvolumina im Ölkreislauf befinden.

3.3 Fazit

Es ist am Laborgerät gezeigt worden, dass eine Regelung des Luftgehaltes für einige Luft–Öl–Gemische möglich ist. Dabei kann das Einbringen der Luft durch eine Lineardrossel oder eine Einspritzdüse geschehen. Im Weiteren wird der Luftzweig beurteilt, anschließend der Hydraulikkreislauf.

Als nachteilig beim Einsatz des Drosselventils im Luftzweig hat sich herausgestellt, dass das Öl dessen Funktionsweise beeinträchtigt und in einigen Fällen sogar zu dessen Ausfall führt. Gegen den Einsatz der Einspritzdüse sprechen der höhere Aufwand durch einen DSP mit Leistungselektronik und die Einkopplungen von Störungen auf den Signalleitungen. Die Möglichkeit der freien Gestaltung der Filter– und Regleralgorithmen rechtfertigt den zusätzlichen Aufwand. Selbst durch den Einsatz von Beobachtern zur Messwertaufbereitung, Führungsfiltern und den weiteren in Abschnitt 3.2.7 untersuchten Verfahren lässt sich der Luftgehalt nicht für jedes Öl regeln.

Die Ursachen dafür finden sich unter anderem im Hydraulikkreislauf. Durch die Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Leitungsabschnitten gelangte Luft ins Öl. Der resultierende Luftgehalt liegt zum Teil über der Führungsgröße, so dass ein Vermessen des Luftabscheideverhaltens unter den geforderten Bedingungen nicht möglich ist. Ein weiterer Mangel sind die Totvolumina des Laborgeräts. Dort kann sich Luft ansammeln und dann zu einer zeitlich begrenzten Überhöhung des Luftgehaltes führen.

Für eine Reduzierung der Schaumhöhe lassen sich zwei Gründe anführen. Zum einen kann durch Luftblasen das Gefüge der Schaumsäule beeinflusst werden. Dabei nehmen aufsteigende Luftblasen andere auf oder zerstören diese. Zum anderen wird durch den gestiegenen Luftgehalt eine Verringerung der eingebrachten Luftmenge durch die Regelung vorgenommen, wodurch sich die Schaumhöhe ebenfalls reduziert.

Einfache Gegenmaßnahmen, wie zum Beispiel ein Abdichten durch Verkleben der Verschraubungen, schränken die Möglichkeiten der Wartung und Reparatur ein. Erschwerend kommt der große Temperaturbereich für die Messungen hinzu, da das Öl bis auf 90 °C erwärmt wird. Die Klebestellen dürfen durch Materialausdehnung nicht reißen, so dass Luft ins Öl gelangt. Dauerhafte Verbesserungen lassen sich durch konstruktive Maßnahmen am Laborgerät erreichen, eine Überarbeitung des Hydraulikkreises wird daher favorisiert.

4 Sensorik zur Luftgehaltsbestimmung

Für eine gute Regelung ist eine präzise und schnelle Messwerterfassung unerlässlich. Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, ist die im Laborgerät verwendete Sensorik zur Luftgehaltserfassung für die Regelung zu langsam. Für die Bestimmung des Luftgehaltes sind beim Laborgerät [Lei07] verschiedene Verfahren betrachtet worden. Die Randbedingungen, die durch die Anlage vorgegeben werden, schränken deren Anwendbarkeit ein. Für eine schnelle Luftgehaltsbestimmung wird die dafür benötigte Sensorik entwickelt. Im Folgenden werden Verfahren zur Luftgehaltsbestimmung vorgestellt und deren Anwendbarkeit wird am Prüfstand untersucht.

4.1 Messverfahren

Mögliche einsetzbare Verfahren zur Online-Luftgehaltsbestimmung sind:

1. Fördermenge einer Pumpe
2. Optische Verfahren
3. Schallgeschwindigkeitsmessung
4. Kapazitive Messung

Fördermenge einer Pumpe: Der Luftgehalt lässt sich nach [Pet45] über die Fördermenge einer Verdrängerpumpe aus der Druckdifferenz über einer Blende ermitteln [Lei07].

Optische Verfahren: Die Bestimmung des Luftgehaltes in einem Kontrollvolumen anhand von Luftblasenverteilung und -durchmesser ist durch Fotografie, Videomesstechnik sowie Partikelzählgeräte [Oeh94] möglich, auch in Kombination mit Lasermesstechnik [Bac02] [Bar79].

Schallgeschwindigkeitsmessung: Ultraschall wird zum Beispiel in der Distanzmessung bei Fahrerassistenzsystemen eingesetzt. Dabei wird ein Signal ausgesandt und dessen Laufzeit bestimmt. Wird statt der Zeit die Leistung des Signals vermessen, dann lässt sich über die Dämpfung der Luftanteil im Öl bestimmen. In der Arbeit von Heisel [Oeh94] wird der Luftblaseneinfluss auf Schallgeschwindigkeit und Druckschwingungen in einem hydraulischen System untersucht.

Kapazitive Messung: Das Luft–Öl–Gemisch durchströmt einen Ringspaltkondensator. Durch die Bestimmung der komplexen Impedanz in Abhängigkeit von der Messfrequenz lässt sich der Luftgehalt bestimmen [flu01]. Dazu muss das Messgerät auf das jeweilige Öl und die Messtemperatur kalibriert werden. Die kapazitive Auswertung eines ölgefüllten Kondensators lässt sich auch für die Alterungsbestimmung von Ölen einsetzen [Rab03, Kra05]. Die Umsetzung für die Regelung beschränkt sich ausschließlich auf die Bestimmung des Luftgehaltes.

Zur Messung des Luftgehaltes sind verschiedene Methoden bekannt, die auf die Verwendbarkeit für die Implementierung einer Regelung überprüft werden.

4.1.1 Fördermenge einer Pumpe

Mittels der Messung des Streckendrucks vor und hinter der Drossel werden Rückschlüsse auf den aktuellen Luftgehalt gezogen [Pet45, Lei07]. Da der Druck in Abhängigkeit von der Viskosität des zu vermessenden Öls und der Temperatur variiert, wird der Temperatur–Druck–Verlauf ermittelt und anschließend die Temperatur mit Hilfe eines Thermostats konstant gehalten. Untersuchungen des Druckverlaufs ergeben, dass daraus eine Abschätzung des Luftgehaltes möglich ist. Ein Abstützen der Regelung des Luftgehaltes auf diese Schätzwerte führt hier jedoch zu keinem akzeptablen Ergebnis.

Die Luftgehalts– und Druckverläufe sind in Bild 4.1 dargestellt. Zu Beginn steigt der Druck an, da nur luftfreies Öl gefördert wird, mit steigendem Luftgehalt nimmt der Öldruck ab. Deutlich erkennbar sind die beiden sprungförmigen Änderungen des Luftgehaltes zu Beginn, die beide nur minimale Auswirkungen auf den Druckverlauf haben. Da der Luftgehalt bis auf $\pm 0,5$ Vol.-% geregelt werden soll, aber Änderungen von fast 2 Vol.-% nicht erkannt werden, wird für das Laborgerät das Abschätzen des Luftgehaltes aus dem Streckendruck für die Regelung ausgeschlossen.

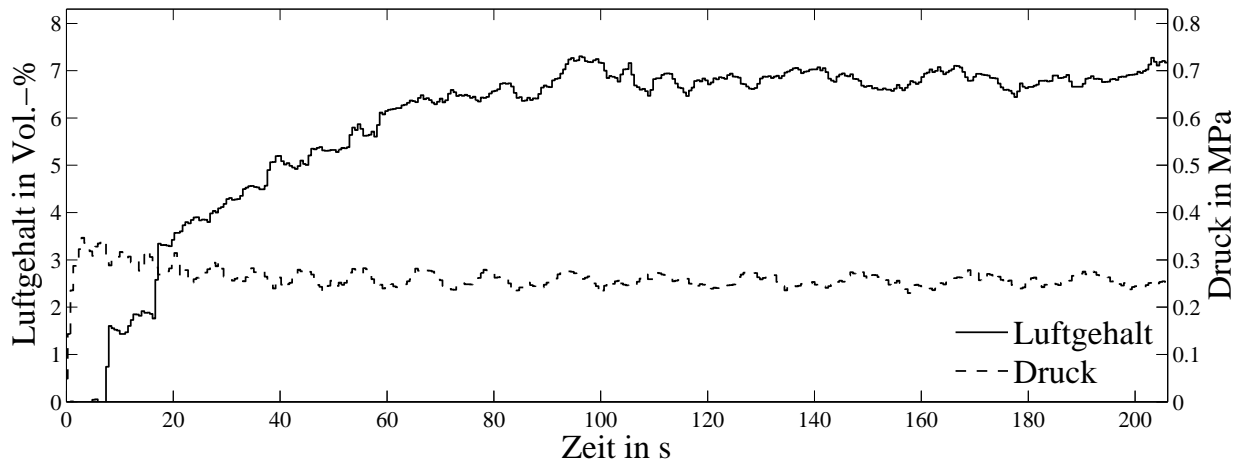


Bild 4.1: Ausreißer im Luftgehalt sind nicht im Druckverlauf erkennbar

4.1.2 Optische Verfahren

Die Auswertung mit Hilfe optischer Messverfahren eignet sich wegen der im Prüfaufbau verwendeten Rohrleitungen nicht, da eine Beobachtung des Schaums in den Leitungen nicht möglich ist. Eine Betrachtung außerhalb wird durch die spezielle Beleuchtung des Glaszylinders für die Schaumzerfallsmessung erschwert. Das wichtigste Argument gegen den Einsatz der Videomesstechnik ist jedoch die Farbe des Schaums: Sie reicht von hellem braun über rot bis zu schwarz. Da schon die Unterscheidung des Luftgehaltes mit bloßem Auge nicht möglich ist, wird von einer visuellen Bestimmung des Luftgehaltes abgesehen.

4.1.3 Schallgeschwindigkeitsmessung

Für den Einsatz der Ultraschallmesstechnik am Laborgerät sprechen die einfache Ankopplung der Aktoren und Sensoren an die Rohrleitung sowie die gute Auswertbarkeit der Signale. Letztere ist im Labor getestet worden. Dazu ist eigens ein Ölkreislauf mit einem Rohrabchnitt wie in Bild 4.2 aufgebaut worden. Die Sensorik sollte den gleichen Strömungswiderstand wie der übrige Kreislauf aufweisen, um eine Druckzunahme aufgrund des Strömungswiderstandes zu vermeiden, da sich die Luft sonst im Öl löst.

Das Messsystem besteht aus einem Rohr, das mit einem Sender S und einem Empfänger E ausgestattet wird. Auf der linken Seite befindet sich der Zulauf des Luft-Öl-Gemischs, auf der rechten der Abfluss. Mit (1) und (2) sind die Übertragungswege des Ultraschallsignals bezeichnet.

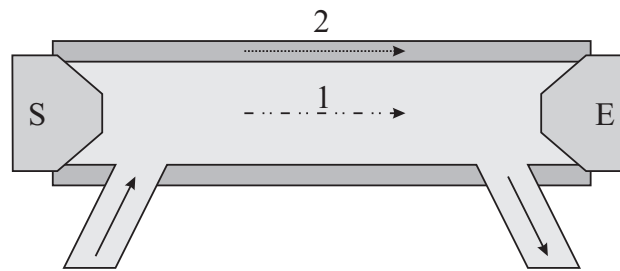


Bild 4.2: Messaufbau Ultraschall

Zur Bestimmung des Luftgehaltes werden die Laufzeit vom Sender zum Empfänger und die Energie des Signals bestimmt. Das über den Übertragungsweg (1) laufende Signal enthält die Informationen über den Luftgehalt. Über den Weg (2) breitet sich durch die Rohrleitung Körperschall aus, der für die Auswertung störend ist. Durch den Körperschall koppeln auch weitere Störsignale ein, die herausgefiltert werden müssen. Messungen für einen sehr geringen Luftanteil ergeben, dass die Dämpfung für beide Auswertungsverfahren so hoch ist, dass eine Luftgehaltsbestimmung am Prüfaufbau nicht möglich ist. Störungen durch den Körperschall der Pumpe, des Motors etc. sind dabei noch nicht berücksichtigt.

4.1.4 Kapazitive Messung

Für die kapazitive Bestimmung des Luftgehaltes ist ein Zylinderkondensator konstruiert worden, der den gleichen Strömungswiderstand wie die Leitung des Hydraulikkreislaufes aufweist. Dadurch wird vermieden, dass sich die Luft in Folge eines Druckanstiegs im Öl löst und somit nicht mehr messbar ist. Über die Bestimmung der Kapazität können Rückschlüsse auf das Dielektrikum und somit auf den Luftgehalt gezogen werden. Bild 4.3 zeigt den Aufbau des Kondensators.

Für den einfachen Fall, dass ein Zylinderkondensator mit nur einem Medium oder mehreren voneinander getrennten Medien gefüllt ist, wobei die Medien isotrop und homogenen seien, gilt für die elektrische Flussdichte:

$$\underline{D} = \epsilon \cdot \underline{E} \quad (4.1)$$

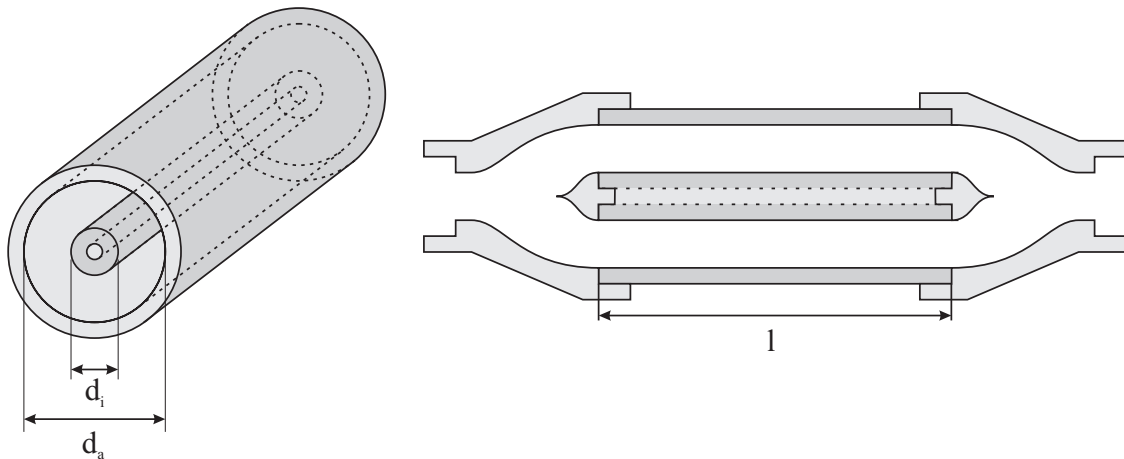


Bild 4.3: Kondensator

Über die Ladung Q lässt sich die Kapazität bestimmen zu:

$$Q = \oint_A \underline{D} \, dA \quad (4.2)$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{\int \underline{E} \, ds} \quad (4.3)$$

Ist der Zylinderkondensator in diesem Fall mit nur einem Medium gefüllt, so lässt sich seine Kapazität wie folgt angeben:

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)} \quad (4.4)$$

Unter Vernachlässigung der beiden Randbereiche und mit den Abmessungen der Konstruktion ergeben sich für unterschiedliche Öle die in Tabelle 4.1 aufgeführten Kapazitäten. Je nach verwendetem Öl, Zusatzstoffen und Grad der Verunreinigung, um einige Beispiele zu nennen, variieren die Dielektrizitätszahlen.

Die Tabelle 4.1 zeigt einen Ausschnitt von Ölen mit zur Verfügung stehenden Dielektrizitätskonstanten. Da diese in der Praxis nicht zu den angegebenen Charakteristiken von Getriebe- und Motorenölen gehören, ist eine Abschätzung des Wertebereiches schwierig. Es wird daher angenommen, dass die Dielektrizitätskonstanten der zu vermessenden Öle den Wertebereich der Tabelle abdecken.

Da die vorhergehenden Verfahren für die Bestimmung des Luftgehaltes ungeeignet sind, wird die Bestimmung des Luftgehaltes über eine Kapazitätsänderung weiterverfolgt. Je mehr Luft

Tabelle 4.1: Dielektrizitätszahlen unterschiedlicher Öle und daraus resultierende Kapazitäten

Medium	Dielektrizitätszahl	Kapazität
Luft	1,0	9,94 pF
Olivenöl	3,0	29,82 pF
Parafinöl	2,2	21,87 pF
Rizinusöl	4,7	46,72 pF
Trafoöl, mineralisch	2,2	21,87 pF
Trafoöl, pflanzlich	2,5	24,85 pF

ins Öl eingebracht wird, desto geringer wird die Kapazität. Für den Sonderfall, dass der Zylinderkondensator sowohl mit Öl als auch Luft befüllt wird, bleiben zwei Möglichkeiten, die genauer untersucht werden, die Reihenschaltung und die Parallelschaltung der Kapazitäten. Dabei sind beide Grenzfälle nur für die Modellierung der Kapazität relevant. Für die Betrachtung wird die Kapazität für einen gegebenen Zylinderkondensator mit einem Öl ($\epsilon_r = 3$) berechnet.

1. Parallelschaltung der Kapazitäten

Wird der Kondensator sukzessiv aufgefüllt, so entspricht das einer Parallelschaltung zweier Kondensatoren mit unterschiedlichen Dielektrika, von denen der eine mit Öl und der andere mit Luft gefüllt ist. Die Kapazität des Kondensators berechnet sich zu:

$$C_{gesamt} = C_{Luft} + C_{Öl}$$

Daraus lässt sich der in Bild 4.4a dargestellte Verlauf der Kapazität über den Luftgehalt des Kondensator berechnen. Da auf einen Luftgehalt von 5 Vol.-% geregelt werden soll, wird bei den Darstellungen von einem ölbefüllten Kondensator ausgegangen, der mit Luft befüllt wird.

2. Reihenschaltung der Kapazitäten

Wird der Kondensator von innen nach außen, oder umgekehrt, mit Luft gefüllt, so entspricht das einer Reihenschaltung von zwei Kondensatoren. Die Gesamtkapazität lässt sich angeben zu:

$$\frac{1}{C_{gesamt}} = \frac{1}{C_{Luft}} + \frac{1}{C_{Öl}}$$

Es ergeben sich somit die Verläufe der Kapazität aus Bild 4.4b. In einem Fall lagert sich die Luft von außen beginnend an, im anderen Fall von innen.

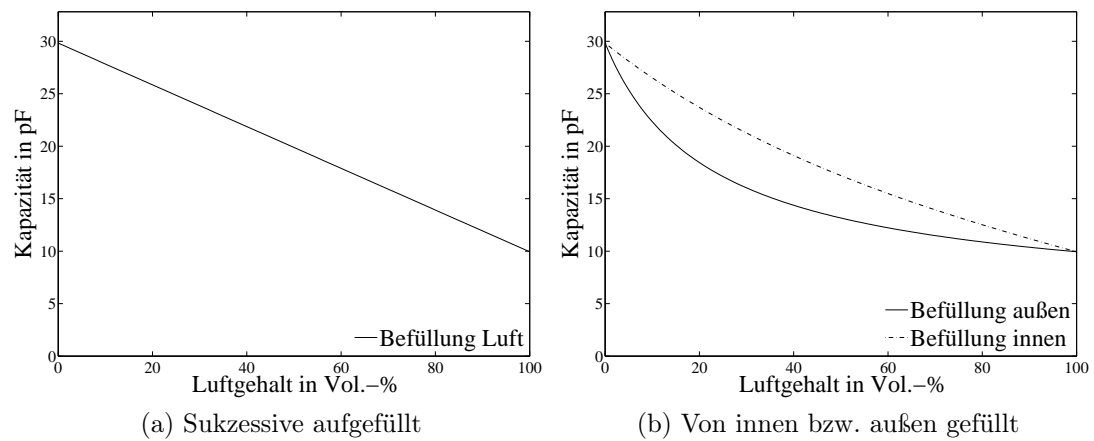


Bild 4.4: Kapazitätsverläufe

Diese beiden einfachen Modelle der Kapazitätsbestimmung können hier für die Bestimmung des Luftgehaltes nicht genutzt werden, da das Luft-Öl-Gemisch kein isotropes und homogenes Medium darstellt. Sie dienen der späteren Überprüfung der Ergebnisse.

4.2 Bestimmung der effektiven Dielektrizitätszahl

Für die Bestimmung des Luftgehaltes über eine Kapazitätsmessung kann nicht mehr von einer homogenen und isotropen Anordnung im Kondensator ausgegangen werden. Bild 4.5 veranschaulicht die Verteilung der Luftbläschen in der Radialebene.

Durch die unterschiedlichen Abmessungen und Formen wird das \underline{E} -Feld so stark beeinflusst, dass die Vereinfachung als Reihen-/Parallelschaltung unzulässig ist. Daher erfolgt hier die Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten mit Hilfe der Effektive-Medien-Theorie. Für heterogene Gemische lässt sich die Materialgleichung um die Polarisation \underline{P} erweitern:

$$\underline{D} = \epsilon \cdot \underline{E} + \underline{P} \quad (4.5)$$

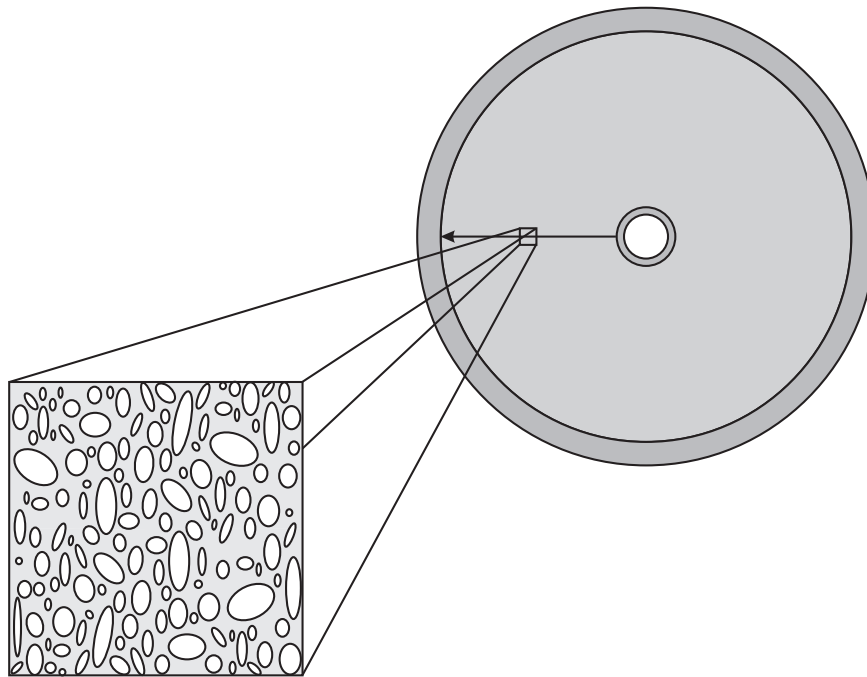


Bild 4.5: Kondensatorabschnitt mit Luft-Öl-Gemisch

Die Problematik besteht darin, für das aktuelle heterogene Gemisch eine mathematische Beschreibung der elektrischen Feldstärke für jeden Punkt anzugeben, da keine Informationen über mikroskopische Zustände vorliegen. Für viele Anwendungen sind die exakten Beschreibungen an den einzelnen Raumpunkten nicht von Interesse, es soll vielmehr eine Aussage bezüglich der makroskopischen Eigenschaften des Mediums getroffen werden. Mit Hilfe der

Effektive-Medien-Theorie soll für die Dielektrizitätskonstante eine Modellierung gefunden werden, die die Materialeigenschaften und Durchmischung hinreichend genau beschreibt.

Für ein kubisch-primitives Gittermodell (Clausius-Mossotti-Modell, Bild 4.6) lässt sich mit Hilfe der Polarisierbarkeit α_P die elektrische Feldstärke für polarisierbare und freie Stellen angeben. Der Zusammenhang zwischen der Polarisation \underline{P} und der Polarisierbarkeit α_P lässt sich für einen betrachteten Ort durch die lokale Feldstärke angeben zu [Sch70]:

$$\underline{P} = N \alpha_P \underline{E}_{\text{lokal}} \quad (4.6)$$

Durch Superposition der einzelnen Feldstärken erhält man die Clausius-Mossotti-Gleichung [Asp82, Roc96]:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N \alpha_P}{3 \epsilon_0} \quad (4.7)$$

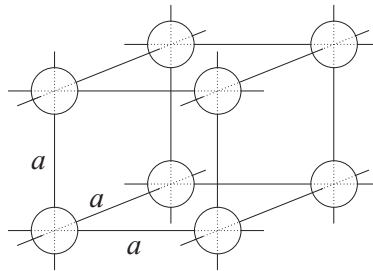


Bild 4.6: Kubisch-primitives Gittermodell

Die Teilchendichte des Mediums wird durch N beschrieben. Es ist ein vereinfachtes Modell, aber es beschreibt den Zusammenhang zwischen der Struktur und der elektrischen Feldstärke. Der einfachste Fall eines heterogenen Gemisches weist nur zwei Komponenten mit unterschiedlicher Polarisierbarkeit α_1 und α_2 auf. Mit der Clausius-Mossotti-Gleichung 4.7 erhält man:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{1}{3 \epsilon_0} (N_1 \alpha_1 + N_2 \alpha_2) \quad (4.8)$$

Die relative Dielektrizitätskonstante des Gemisches ist durch ϵ_r angegeben, die einzelnen Polarisierbarkeiten α_i lassen sich jedoch nicht messen. Sind die Komponenten des Gemischs

in Reinform beschreibbar, so lässt sich aus 4.7 und 4.8 der Zusammenhang mit der Lorentz–Lorenz–Gleichung angeben zu:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = f_1 \cdot \left(\frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 2} \right) + f_2 \cdot \left(\frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2 + 2} \right) \quad (4.9)$$

Die Füllfaktoren der beteiligten Komponenten sind wie folgt definiert:

$$f_{1,2} = \left(\frac{N_{1,2}}{N_1 + N_2} \right) \quad (4.10)$$

Geht man davon aus, dass beide Phasen in einem Trägermedium ϵ_T eingebettet sind, folgt allgemein:

$$\frac{\epsilon_r - \epsilon_T}{\epsilon_r + 2 \epsilon_T} = f_1 \cdot \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_T}{\epsilon_2 + 2 \epsilon_T} \right) + f_2 \cdot \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_T}{\epsilon_2 + 2 \epsilon_T} \right) \quad (4.11)$$

Wird in der betrachteten Problemstellung das Öl als Träger des zweiten Mediums (Luft) aufgefasst, ist eine weitere Vereinfachung der Gleichung 4.11 mit $\epsilon_1 = \epsilon_T$ zur Maxwell–Garnett–Gleichung möglich:

$$\frac{\epsilon_r - \epsilon_1}{\epsilon_r + 2 \epsilon_1} = f_2 \cdot \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2 \epsilon_1} \right) \quad (4.12)$$

Die Annahme bei der Lorentz–Lorenz–Gleichung ist, dass aus zwei verschiedenen Medien eines entsteht, das keine getrennten Eigenschaften mehr aufweist. Dem gegenüber steht die Annahme der Maxwell–Garnett–Gleichung, bei der beide Medien ihre Eigenschaften behalten. Beim Schaum wird von Öl mit feinen Luftbläschen ausgegangen, so dass Gleichung 4.12 für die Auswertung des Luftgehaltes verwendet wird.

4.3 Plausibilitätsüberprüfung und Temperaturabhängigkeit

Für die vier unterschiedlichen Kapazitätsberechnungen sind die Verläufe für einen Luftgehalt kleiner 15 Vol.-% in Bild 4.7 dargestellt. Der Arbeitspunkt für die zu entwickelnde Regelung sei dabei 5 Vol.-%. Die Kurven für eine Berechnung der Kapazität mit einer effektiven Dielektrizitätszahl ϵ_r nach Lorentz–Lorenz oder Maxwell–Garnett sollen durch die im Abschnitt

Tabelle 4.2: Messwertstreuung

Mittelwert	30,09 pF
Standardabweichung	0,12 pF
Varianz	0,0144 pF

4.1.4 aufgestellten Grenzfälle, die Anordnung der Parallelschaltung bzw. Reihenschaltung, verglichen werden. Da für den Luftgehalt zwischen 0 Vol.-% und 15 Vol.-% die nach den Gleichungen 4.9 und 4.12 berechneten Kapazitäten im Bereich der Abschätzungen liegen, wird die Gleichung 4.12 auf den Kondensator angewandt.

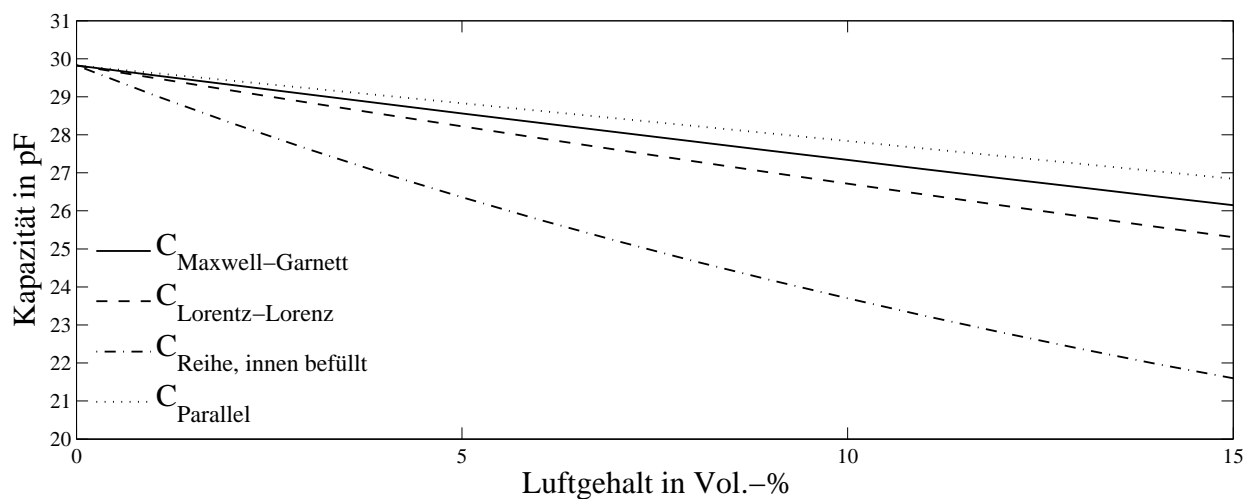


Bild 4.7: Vergleich der berechneten Kapazitäten

Einer Luftgehaltsänderung von ± 1 Vol.-% steht eine Kapazitätsänderung von 0,5 pF gegenüber. Soll der Luftgehalt auf 0,1 Vol.-% genau aufgelöst werden, so muss die Kapazität auf 0,05 pF genau bestimmt werden. Die Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur für luftfreies Öl ist mit einem RLC-Messgerät vermessen worden und kann Bild 4.8 entnommen werden. Dabei wird die Temperatur am Zufluss und Abfluss des Kondensators erfasst.

Über den gesamten Arbeitsbereich von 25 °C bis 60 °C liegt die Kapazität im Bereich zwischen 31,4 pF und 30,9 pF. Die Schwankungen liegen im Bereich der Auflösung des Messgerätes, eine Temperaturabhängigkeit ist nicht erkennbar und die Kapazität wird als konstant angenommen. Die gemessene Kapazität entspricht der berechneten, die Kenngrößen der Kapazitätsbestimmung sind in Tabelle 4.2 aufgetragen.

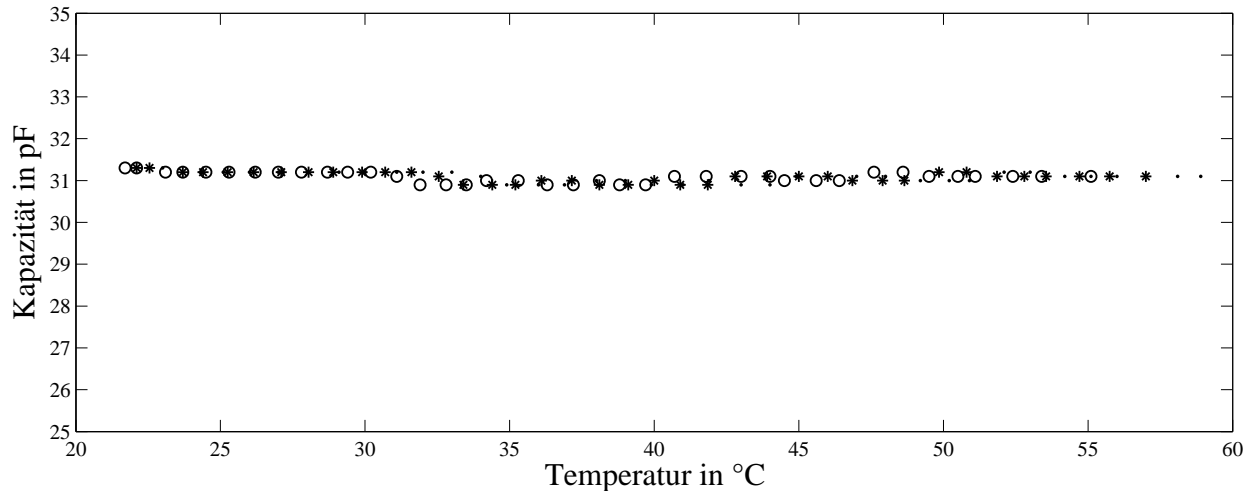


Bild 4.8: Temperaturabhängigkeit des Kondensators

4.4 Kapazitätsauswertung

Im vorhergehenden Abschnitt konnte gezeigt werden, dass der Kondensator aus Abschnitt 4.1.4 für ein luftfreies Öl keine Temperaturabhängigkeit aufweist. Für die Kapazitätsauswertung wird ein spezieller Kapazitäts–Spannungs–Wandler [Ges04] verwendet, der Kapazitäten bis in den Attifarad–Bereich bestimmt. Die Messung erfolgt differentiell und kann nur bis zu einer Differenz von 4 pF durchgeführt werden. Daraus ergibt sich die Frage, wie der zweite Kondensator auf die Kapazität des befüllten Kondensators kalibriert werden kann. Zusätzlich muss die resultierende Anordnung temperaturstabil sein.

Da ein Abgleich der zweiten Kapazität auf den befüllten Kondensator in diesem Bereich nicht möglich ist, wird ein zweiter baugleicher Kondensator für die Bestimmung der Kapazität und somit des Luftgehaltes eingesetzt. Dieser dient dabei als Referenz. Er enthält die luftfreie Ölprobe, der andere Kondensator befindet sich im Hydraulikkreis im mit Luft versetzten Öl. Die Platine ist direkt und symmetrisch an die beiden Kondensatoren angeschlossen und wertet die Kapazitäten im 20 kHz–Takt aus.

Bild 4.9 zeigt den Messaufbau zur Kapazitätsbestimmung. Der Kapazitäts–Spannungs–Umsetzer steuert die Aufladung der Kondensatoren und bestimmt daraus die Differenzkapazität.

Diese wird als analoge Spannung V_{Mess} dem DSP zugeführt. Zur Unterdrückung von Spannungsschwankungen, Einkopplungen auf die Betriebsspannung oder Temperatureinflüssen wird die Referenzspannung V_{Ref} subtrahiert.

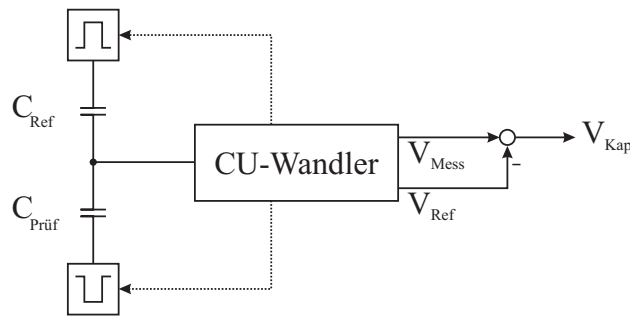


Bild 4.9: Kapazitätsbestimmung

Aus der Spannungsdifferenz V_{Kap} und der Kondensatorgleichung 4.4 lässt sich ϵ_{eff} bestimmen zu:

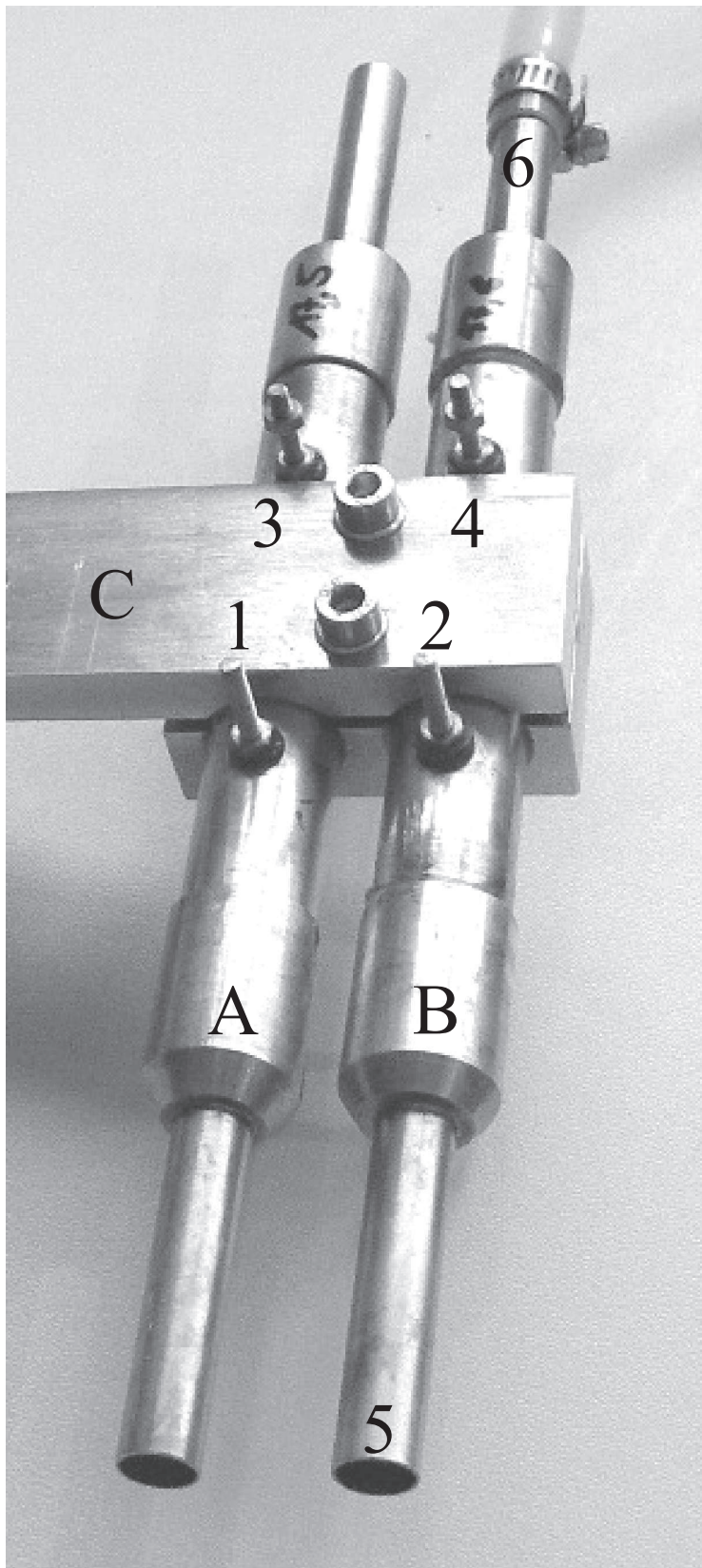
$$\epsilon_{eff} = \frac{C_{Prüf} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \epsilon_0} \quad (4.13)$$

$$\epsilon_{Öl} = \frac{C_{Ref} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \epsilon_0} \quad (4.14)$$

Anschließend lässt sich mit Hilfe der Maxwell–Garnett–Gleichung 4.12 der Luftgehalt wie folgt bestimmen:

$$c_0 \sim f_2 = \frac{1 - \epsilon_{Öl}}{1 + 2 \epsilon_{Öl}} \cdot \frac{\epsilon_{eff} + 2 \epsilon_{Öl}}{\epsilon_{eff} - \epsilon_{Öl}} \quad (4.15)$$

Bild 4.10 zeigt den Aufbau der Kondensatoranordnung. Im Referenzkondensator (A) wird die gleiche Ölprobe eingefüllt wie in der Prüfanlage, über die Halterung (C) wird dieser vom Prüfkondensator (B) aufgeheizt. Die Halterungen (1) bis (4) fixieren die inneren Zylinder. An den Halterungen (2) und (4) wird zusätzlich die Auswertungsplatine zur symmetrischen Kapazitätsbestimmung befestigt.



A Referenzkondensator

1 Halterung

2 Messpunkt, Halterung

B Prüfkondensator

3 Halterung

4 Messpunkt, Halterung

5 Zufluss

6 Abfluss

C Halterung

Bild 4.10: Kondensatoranordnung

5 Versuchsstand zur Luftgehaltsregelung

Zur Bestimmung des Luftabscheidevermögens von Ölen ist ein weiterer Versuchsstand entwickelt worden, aufbauend auf den Erkenntnissen des in Abschnitt 3 beschriebenen Laborgerätes. Im Vordergrund steht dabei nicht die vollständige Automatisierung des Versuchsstandes, sondern die Beantwortung der offenen Fragen zur Einspritzung, der Vermischung von Öl und Luft sowie der schnellen Bestimmung des Luftgehaltes (vgl. Abschnitt 4.1.4).

Die daraus resultierende Topologie des neuen Versuchsstandes ist in Bild 5.1 abgebildet. Das Kernstück dieser Anlage ist der DSP. Er erfüllt verschiedene regelungstechnische Aufgaben, ohne eine zusätzliche Verwendung einer SPS. Links davon sind die Sensoren der analogen Messgrößen abgebildet, rechts die Aktoren. Das diskrete Synchronisationssignal (3) der Pumpe („Sync.“) wird für die Regelung des Luftgehaltes genutzt und ist in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

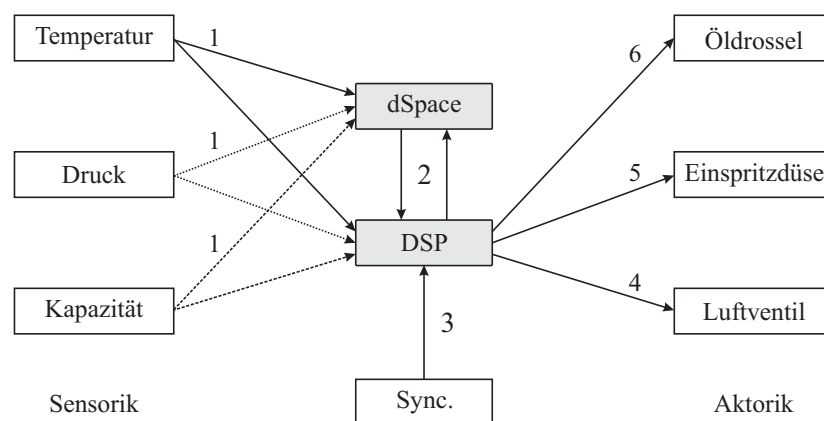


Bild 5.1: Topologie des neuen Versuchsstandes

Die Messgrößen der Strecke, wie Druck, Temperatur und Kapazität, werden analog an den DSP und zur Datenerfassung an einen PC mit angeschlossener dSPACE AutoBox übermittelt (1). Die Regelung des Luftgehaltes erfolgt durch den DSP. Dabei werden das Luftventil durch

ein diskretes Signal (4) und die Düse durch ein pulsweitenmoduliertes Signal (5) angesteuert. Der Öffnungsgrad des Öldrosselventils wird durch einen Antrieb gestellt, die Ansteuerung erfolgt durch ein diskretes Signal (6).

Zur Identifikation der Streckenparameter wird die Stellgröße der Einspritzdüse vom PC an den DSP übermittelt, der Datenaustausch erfolgt durch eine TCP/IP-Verbindung (2).

Bevor auf die Modellbildung und Regelung eingegangen wird, müssen die dabei entscheidenden Parameter für den Luftzweig wie der Einspritzpunkt, der Einspritzdruck sowie der Zuleitungsquerschnitt bestimmt werden. Dadurch kann ein konstanter Luftgehalt im Öl bei der Verschäumung gewährleistet werden. Das Öl und die Luft werden unter Druck gesetzt, wodurch sich die Luft im Öl löst. In diesem Zustand ist der Luftanteil nicht messbar. Der Schaum entsteht dadurch, dass das Öl am Drosselventil schlagartig entspannt, wobei die Luft austritt. Im folgenden Abschnitt wird eine geeignete Einspritzkonfiguration ermittelt.

5.1 Einspritzung

Der optimale Einspritzpunkt sowie der passende Leitungsquerschnitt sind am Versuchsstand empirisch ermittelt worden. Dazu sind die folgenden Parameter der Reihe nach bestimmt worden.

Begonnen worden ist mit dem Untersuchen des Einspritzpunktes und der Wahl der passenden Kanüle. Für die Untersuchungen ist von einem Luftdruck von 0,1 MPa ausgegangen worden, um einen konstanten Volumenstrom einzustellen. Dabei wird der gleiche Druck wie bei dem unter Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Laborgerät eingestellt.

5.1.1 Kanüledurchmesser und Position der Einspritzung

Im Abschnitt 3.2.3 wird die Charakteristik der Einspritzdüse vorgestellt. Die Luftmenge wird dort durch eine PFM-gesteuerte Einspritzung ins Öl eingebracht. Dadurch entstehen in der Leitung Abschnitte, in denen entweder nur Öl (später Schaum) oder nur Luft transportiert werden. Diese „Pakete“ werden durch die Pumpe unter Druck gesetzt und anschließend schlagartig entspannt. Der Luftgehalt des entstandenen Schaums wird durch den Kondensator gemessen. Durch diese Modulation kann kein konstanter Luftgehalt eingestellt werden, da die zeitlichen Abstände der einzelnen Pakete zu groß sind. Somit entsteht keine gleichmäßige Vermischung von Öl und Luft und der gemessene Luftgehalt variiert. Für die Ansteuerung der Einspritzdüse wird stattdessen ein PWM-Signal mit fester Periodendauer eingesetzt.

Die Luft wird in kürzeren Intervallen in kleineren Mengen eingespritzt. Bei den geringen Luftmengen, die ins Öl eingebracht werden, muss sichergestellt sein, dass sie entweder kontinuierlich (Bild 5.2b) oder zumindestens gleichmäßig (Bild 5.2a) eingebracht werden. Dieses erzeugt nach dem Entspannen einen homogenen Schaum. Wird zu viel Luft in die Leitung gedrückt, so entstehen auch hier Abschnitte, die entweder nur mit Öl oder nur mit Luft gefüllt sind (Bild 5.2c). Das ist zu vermeiden, da so keine gleichmäßige Vermischung des Öls mit der Luft gewährleistet werden kann.

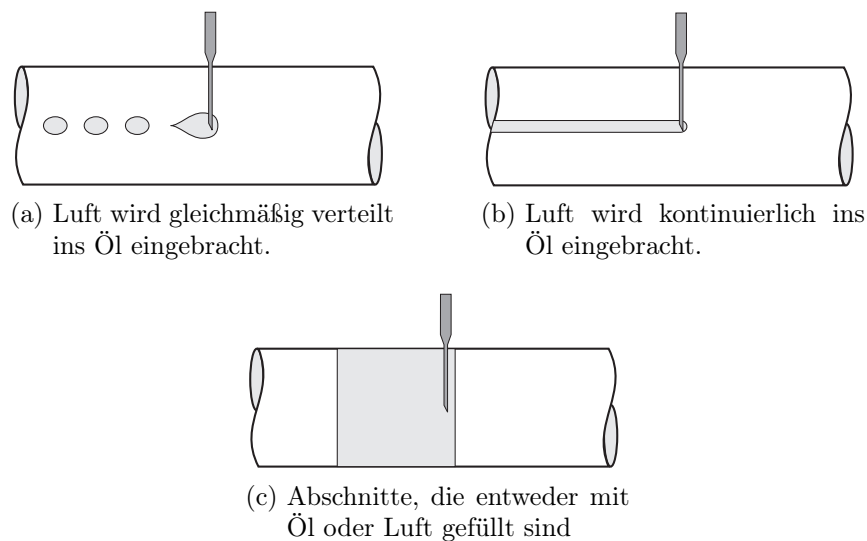


Bild 5.2: Lufteinbringung mit Kanüle

Um die geringen Luftmengen ohne zusätzliche Totvolumina mittig in die Rohrleitung einzubringen, haben sich bei einem Leitungsinwenddurchmesser von 10 mm Einwegkanülen aus der Medizintechnik als geeignet erwiesen. Sie besitzen einen genormten Anschluss. Durch die verschiedenen Durchmesser der verwendeten Kanülen zwischen 0,45 mm und 0,9 mm kann der Strömungswiderstand für die Luft eingestellt werden. Der Tabelle 5.1 können die Kenngrößen der getesteten Kanülen entnommen werden.

Tabelle 5.1: Verwendete Einwegkanülen

Länge	Durchmesser	Bezeichnung ¹
40 mm	0,9 mm	Größe 1
38 mm	0,8 mm	Größe 2
32 mm	0,7 mm	Größe 12
23 mm	0,45 mm	Größe 18

¹Trotz der genormten Größenangabe variieren die Längen der Kanülen je nach Hersteller um einige Millimeter. Es sind auch Kanülen mit größeren Durchmessern erhältlich, dabei handelt es sich unter anderem um Sonderanfertigungen für einen mehrmaligen Gebrauch.

Beim Vergleich der vier Kanülen bei einem konstanten Einspritzdruck von 0,1 MPa erweisen sich die Größen 1 und 2 für den Versuchsstand als gut geeignet. Der Strömungswiderstand der Kanülen lässt ein Einstellen des Luftgehaltes zwischen 0 Vol.-% und mehr als 10 Vol.-% zu.

Der Stellbereich einer Kanüle der Größe 18 ist dagegen sehr gering. Hinzu kommt, dass die Kanüle in den Hydraulikkreis eingebaut wird und somit eine entsprechende Mindestlänge haben muss. Die Größe 18 ist für den Einbau zu kurz und kommt daher nicht zum Einsatz. Bei den übrigen drei Kanülentypen sind die Unterschiede der Durchmesser minimal. Bei den Größen 1 und 2 stimmt auch die Länge beinahe überein. Um einen möglichst geringen Strömungswiderstand für die Luft zu erzeugen, wird die Kanüle der Größe 1 für den Einsatz am Versuchsstand gewählt.

Im Folgenden wird die Wahl des optimalen Einspritzpunktes untersucht. In Bild 5.3 ist der Hydraulikkreislauf des Versuchsstandes dargestellt. Mit E1 bis E3 sind die drei in Frage kommenden Positionen der Kanüle für die Einspritzung bezeichnet. Etwa 10 cm hinter der Entnahmestelle des Öls aus Behälter (1) wird beim mit E1 gekennzeichneten Einspritzpunkt die Luft mittig in die Schlauchleitung eingebracht. Bei den ersten Messungen ist die Position E1 verwendet worden, da an der durchsichtigen Schlauchleitung eine optische Kontrolle der eingebrachten Luft möglich ist.

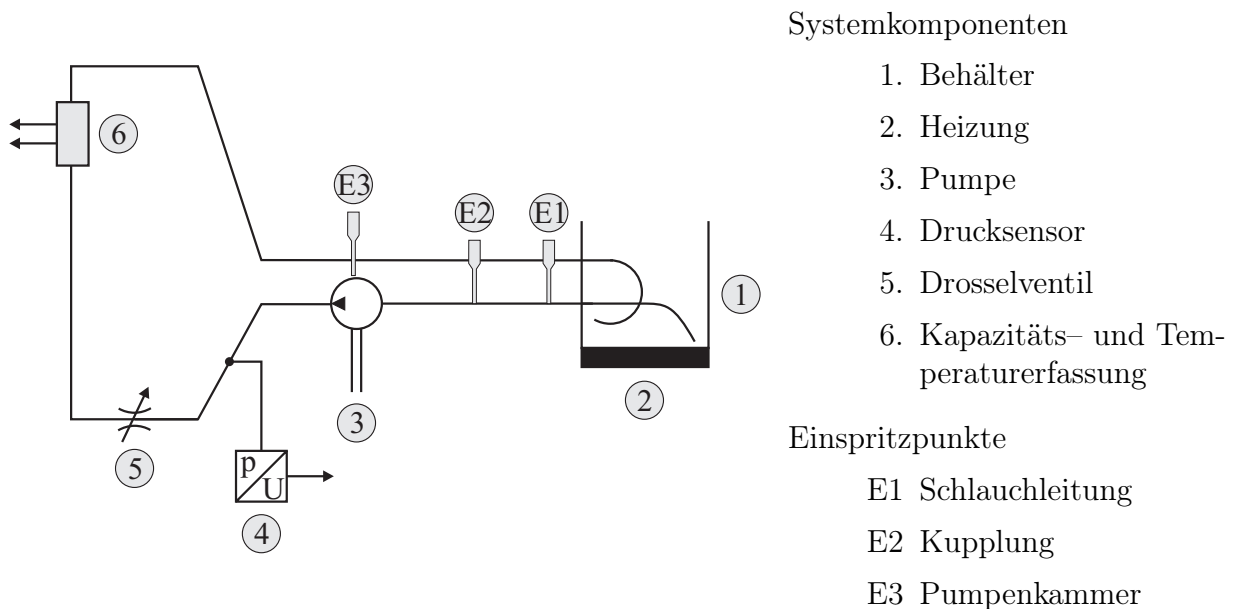


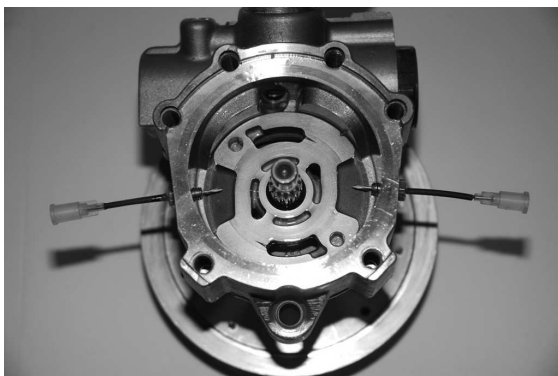
Bild 5.3: Ermittlung des optimalen Einspritzpunktes

Die in Bild 5.2 dargestellten Luftverteilungen im Öl lassen sich, im Gegensatz zur Einspritzung bei E2 und E3, hier noch beobachten. Zwei Probleme treten bei Verwendung dieses

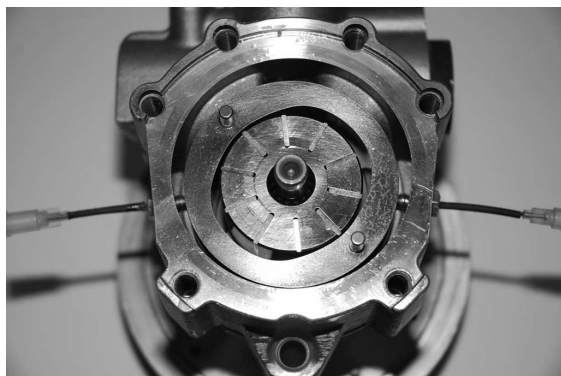
Einspritzpunktes auf. Erstens lässt sich die Kanüle nicht luftdicht mit dem Hydraulikkreis verbinden und zweitens kann kein kontinuierlicher Lufttransport über den langen Weg bis zur Pumpe gewährleistet werden. Grund dafür ist, dass sich im Hydraulikkreis an verschiedenen Stellen Luft ansammelt, die nach einem Ablösen zu erhöhtem Luftgehalt führt. Durch den Einbau in die Kupplung E2 wird eine höhere mechanische Stabilität und eine bessere Dichtigkeit erzielt. Die Kupplung verbindet die Schlauchleitung mit der undurchsichtigen flexiblen Zuleitung der Pumpe. Jedoch tritt auch hier das Problem auf, dass sich Luft sammelt und sich zu zufälligen Zeitpunkten löst.

Daher wird die Luft direkt in die Pumpenkammer E3 eingespritzt. Das Ansammeln der eingespritzten Luft in der Zuleitung der Pumpe wird somit ausgeschlossen. Optische Kontrollen der Luftverteilung sind weder bei E2 noch bei E3 möglich. Da sich für die Einspritzung bei E3 keine weiteren Nachteile ergeben haben, wird diese Position für die folgenden Versuche verwendet.

Bild 5.4a zeigt zwei Kanülen der Größe 1, die so in das leere Gehäuse der Flügelzellenpumpen eingeschraubt sind, dass sie bis in die Pumpenkammer hineinreichen. Im Bild 5.4b ist die Pumpe teilweise zusammengesetzt. Die Enden der Kanülen befinden sich unter dem eingesetzten Ring, so dass die Luft und das Öl von den zehn Dichtleisten (Flügeln) gefördert werden. Da die Dichtleisten durch die Zentrifugalkraft gegen den Ring gedrückt werden und dort abdichten, entsteht ein sich vergrößernder Raum (Saugseite) und ein sich verkleinernder Raum (Druckseite).



(a) Pumpengehäuse ohne Kammereinsatz



(b) Pumpengehäuse ohne Deckel

Bild 5.4: Position E3: Einspritzung in die Pumpenkammer

5.1.2 Leitungsquerschnitt und –länge

Als nächstes werden Leitungsquerschnitt und Leitungslänge für die Lufteinspritzung optimiert. Die getesteten Zuleitungen und ihre Durchmesser können der Tabelle 5.2 entnommen werden. Es handelt sich dabei entweder um Druckluftleitungen oder Zuleitungen für HPLC-Geräte² mit sehr kleinen Durchmessern.

Tabelle 5.2: Leitungsdurchmesser

Innendurchmesser	Bezeichnung
0,17 mm	HPLC-Anschlussleitung
0,25 mm	
0,50 mm	
2,00 mm	Druckluftleitung

Der geringe Durchmesser ist wichtig, da die Leitung sonst als Speicher fungiert und eine Regelung des Luftgehaltes nicht möglich ist. Mit jedem Einspritzimpuls muss eine bestimmte Luftmenge ins Öl gelangen. Stellt die Leitung ein großes Volumen dar, das mit jedem Impuls befüllt wird, so stellt sich ein maximaler Luftgehalt ein, da über den Zeitraum zwischen den Einspritzimpulsen die Luft aus der Zuleitung ins Öl gesaugt wird. Anschaulich lässt sich das Verhalten mit der in Bild 5.5 dargestellten Kondensator–Widerstands–Anordnung vergleichen. Mit dem Widerstand R wird der Strömungswiderstand und mit der Kapazität C das Volumen der verwendeten Leitung beschrieben. Mit R_L wird die Luftaufnahme des Öls angenommen. Durch die Ladeimpulse U_A wird der Kondensator aufgeladen. Es stellt sich der durch den Leitungswiderstand begrenzte Strom I ein. Es muss also eine Leitung gefunden werden, die einen Kompromiss aus geringem Strömungswiderstand und Volumen darstellt.

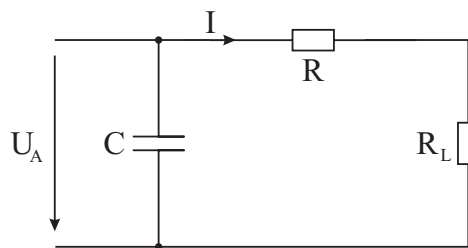


Bild 5.5: Elektrisches Analogon zum Strömungswiderstand der Schlauchleitung

Da eine Bestimmung des Strömungswiderstandes nicht ausschließlich anhand des Durchmessers und der Leitungslänge möglich ist, weil unter anderem keine Informationen über

²Hochleistungsflüssigkeitschromatographie, engl. high performance liquid chromatography

die Oberflächenbeschaffenheit der Leitungssinnenseite vorliegen, erfolgt die Bestimmung der optimalen Länge für die jeweiligen Durchmesser empirisch.

Für jeden Durchmesser werden Zuleitungen in den Längen 5 cm, 10 cm und 15 cm angefertigt und der Luftgehalt bei einem Einspritzdruck von 0,1 MPa erfasst. Für die Regelung muss ein Luftgehalt zwischen 0 Vol.-% und maximal 10 Vol.-% eingestellt werden können. Die passende Kombination aus Leitungslänge und Durchmesser wird dann für den Versuchsstand verwendet.

Dabei hat sich ergeben, dass die Druckluftleitung mit einem Durchmesser von 2 mm selbst für die kleinste Einschaltdauer der Einspritzdüse zuviel Luft einbringt und somit nicht verwendet werden kann. Bei den beiden kleineren Durchmessern der HPLC-Anschlussleitung war bei der 5 cm langen Anschlussleitung ein zu geringer Luftgehalt zu beobachten. Dieser Effekt verstärkte sich bei Verwendung einer längeren Leitung. Als optimale Zuleitung hat sich die HPLC-Anschlussleitung mit einem Durchmesser von 0,5 mm und einer Leitungslänge von 5 cm ergeben. Diese wird für die weiteren Versuche eingesetzt.

5.1.3 Einspritzdruck

Der Einfluss des Einspritzdrucks auf den Luftgehalt wird untersucht. Mit den Erkenntnissen aus den Versuchen am Laborgerät aus Abschnitt 3 und dessen Umbau hat sich ein Einspritzdruck von 0,1 MPa ergeben. Bei diesem Druck wird die Luft annähernd unabhängig vom herrschenden Unterdruck von bis zu 30 kPa ins Öl eingebracht. Dann folgt aus dem Ansteuerungsgrad α_A für das eingebrachte Volumen:

$$\frac{t_{ein}}{t_{Periode}} = \alpha_A \sim V \quad (5.1)$$

Dieser Druck hat sich für den Versuchsstand bestätigt, der Einspritzdruck ist somit auf 0,1 MPa festgelegt und wird für die Verschäumung von Ölen verwendet.

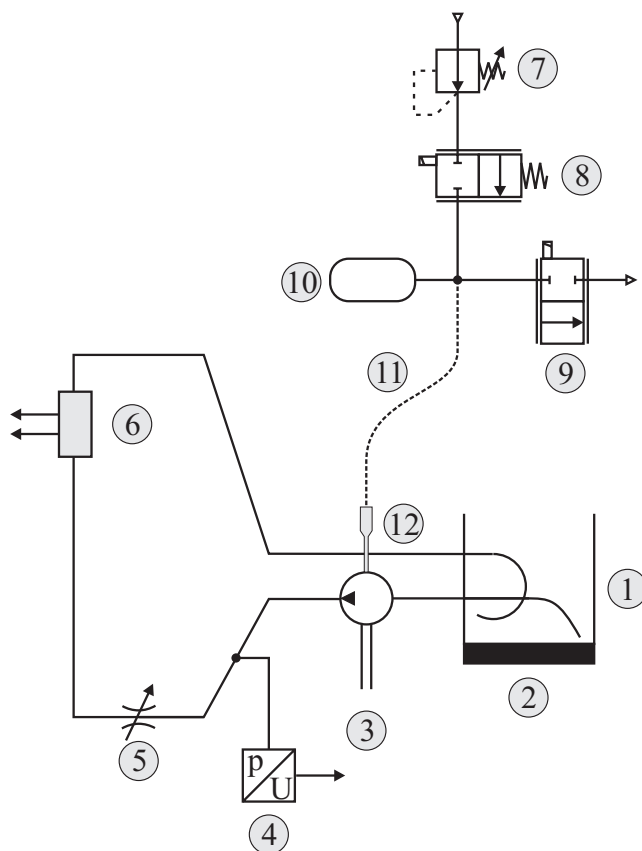
5.1.4 Ergebnisse und Vergleich

Der Versuchsstand ist unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.3 genannten Kriterien konstruiert worden, dazu gehört ein Aufbau des Hydraulikkreises soweit möglich ohne konstruktive Totvolumina und mit großen Krümmungsradien.

Der Querschnitt der Luftzuleitung ist von 2,0 mm auf 0,5 mm reduziert worden. Zusätzlich sind alle industriellen Kupplungen für die Luftzuleitung entfernt worden, da sie bei Unterdruck undicht sind und somit Luft in den Ölkreislauf gelangt.

Die Lufteinspritzung erfolgt durch eine Kanüle direkt in die Pumpenkammer und nicht über einen T-Adapter in den Hydraulikkreis. Sowohl das Laborgerät als auch der Versuchsstand verwenden den gleichen Einspritzdruck von 0,1 MPa.

In Bild 5.6 ist der Aufbau des Versuchsstandes dargestellt. Das im Behälter (1) befindliche Öl wird mit Hilfe einer Wärmeplatte (2) durch einen eigenständigen Regler auf 50 °C erwärmt. Durch die Pumpe (3) und das Drosselventil (5) wird das Öl unter Druck gesetzt. Der entstehende Druck wird mit dem Sensor (4) gemessen. Am Kondensator (6) werden der Luftgehalt und die Öltemperatur für den Verschäumungsprozess ermittelt. Über ein Druckreduzierventil (7) und ein Schaltventil (8) gelangt die Luft in ein 6 ml großes Speichervolumen (10). Durch die Zuleitung (11) und die Kanüle (12) gelangt sie schließlich in die Pumpe (3). Die Einspritzdüse (9) dient als schnelles Schaltventil, das die bei (12) eingebrachte Luftmenge durch Ablassen von Luft vorgibt.



1. Ölbehälter
2. Heizung
3. Pumpe
4. Drucksensor
5. Drosselventil
6. Kondensator mit Temperaturerfassung
7. Druckreduzierventil
8. Schaltventil
9. Einspritzdüse
10. Luftbehälter
11. Zuleitung ($d = 0,5 \text{ mm}$)
12. Kanüle

Bild 5.6: Hydraulikkreis des Versuchsstandes

Tabelle 5.3 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Anlagen mit den oben genannten Parametern.

Tabelle 5.3: Vergleich der beiden Anlagen

	Laborgerät (Abschnitt 3)	Versuchsstand (Abschnitt 5)
Einspritzdruck	0,1 MPa	0,1 MPa
Luftzuleitungsdurchmesser	2,0 mm	0,5 mm
Luftzuleitungslänge ab Düse	1 m	5 cm
Einspritzpunkt	T-Adapter	Pumpenkammer
Einspritzverfahren	seriell	parallel
Regelungsverfahren	Längsregelung	äquivalent zur Querregelung
Aufbau Hydraulikkreis	mit Normwinkeln	strömungsoptimiert

5.2 Untergeordnete Regelungen

Für die Regelung des Luftgehaltes bei einer Vielzahl von Ölen ist es wichtig, die gleichen Randbedingungen vorzugeben. Einflüsse der Temperatur, des Drucks oder der Einspritzdüsenansteuerung wirken sich unmittelbar auf den Luftgehalt aus. Trotzdem nehmen sie im Sinne der Luftgehaltsregelung eine untergeordnete Rolle ein. Bei diesem Versuchsaufbau werden die Auswirkungen auf den Luftgehalt durch zusätzliche Komponenten minimiert. Im Folgenden werden die Druckregelung und die Ansteuerung der Einspritzdüse vorgestellt.

5.2.1 Druckregelung

Im Unterschied zu dem im Abschnitt 3 vorgestellten Laborgerät wird hier der Druck nicht manuell gestellt, sondern durch zusätzliche Aktorik geregelt. Da bei Zunahme von Luftgehalt oder Temperatur der Druck abnimmt, wird durch eine Regelung der Druck nachgeführt. Dazu wird das Drosselventil mit einem Antrieb versehen, der durch einen Dreipunktregler angesteuert wird. Bild 5.7 zeigt das regelungstechnische Blockschaltbild für die Strecke. Die eingerahmten Komponenten stellen den Antrieb und die mechanische Ankopplung an das Drosselventil dar. Der Druckverlauf am Arbeitspunkt wird als eine IT_1 -Strecke angenommen.

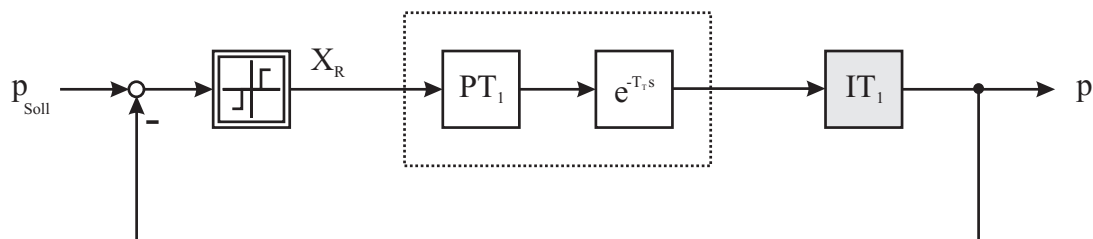


Bild 5.7: Druckregelkreis für den Arbeitspunkt

Da das Drosselventil keine Information über die aktuelle Stellposition oder den Grad der Öffnung ausgibt, wird der Drucksollwert für die Regelung zwischen Heizbetrieb und Prüfbetrieb umgeschaltet. Beim Aufheizen wird auf einen Druck von 0,2 MPa geregelt, beim Verschäumen wird der Drucksollwert auf 2 MPa erhöht.

Obwohl der Leitungsabschnitt, in dem das Luft-Öl-Gemisch unter Druck gesetzt wird, einem wesentlich höheren Druck standhält, wird ein maximaler Druck von 2,5 MPa durch den Sensor vorgegeben. Bild 5.8 zeigt den Druckverlauf für eine Umschaltung vom Heizbetrieb auf den Prüfbetrieb für den gemessenen und den simulierten Druck, ohne dass dabei Luft

ins Öl eingebracht wird. Der Druck ändert sich anfangs nicht, steigt dann zügig an und geht schließlich in eine Dauerschwingung um die Führungsgröße über. Für den Arbeitspunkt ist eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Strecke und Modell gegeben.

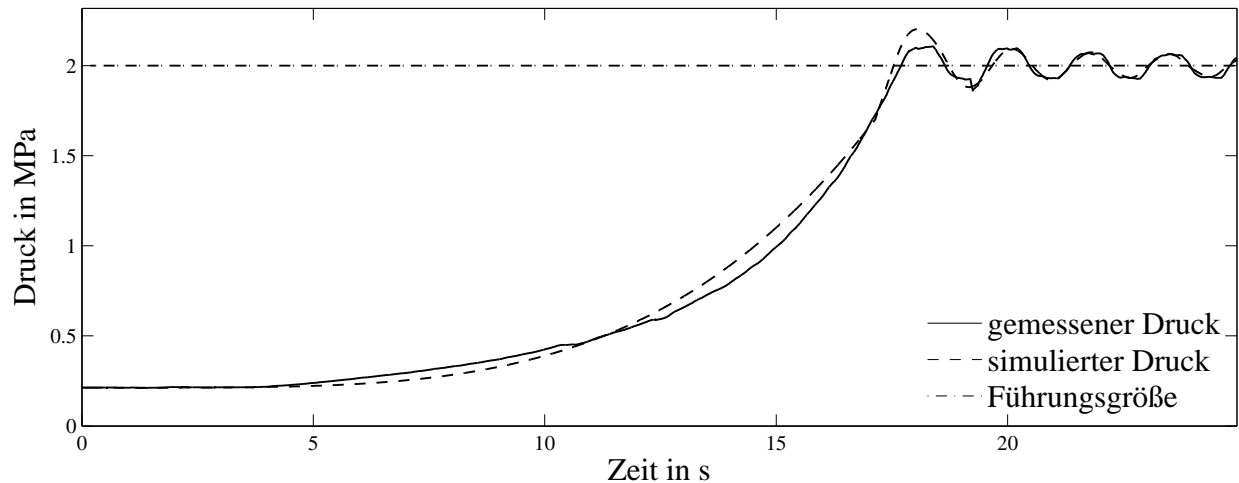


Bild 5.8: Druckverlauf bei Umschaltung der Führungsgröße

5.2.2 Regelung der Einspritzdüse

Bislang ist keine geregelte Ansteuerung der Einspritzdüse erfolgt, sondern sie ist durch Anlegen bzw. Abschalten der Spannung gesteuert worden. Die Ausschaltdauer ist durch die Luftgehaltsregelung variiert worden. Die dabei eingebrachte Luftmenge bei konstantem Druck ist ausschließlich durch die Schaltcharakteristik der Düse bestimmt worden. Nach einem Umstellen auf eine PWM (Bild 5.9) muss gewährleistet sein, dass die eingebrachte Luftmenge proportional zur Einschaltdauer ist, siehe Gleichung 5.1.

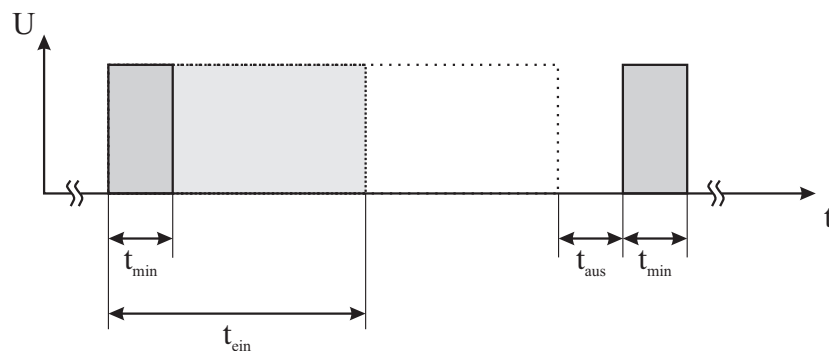


Bild 5.9: Ansteuerungssignal der Einspritzdüse

Die Reaktionszeit der Einspritzdüse muss daher klein gegenüber der minimalen Öffnungszeit t_{min} sein. In den folgenden Abschnitten werden die Konzepte für die Stromregelung der Einspritzdüse und die kammersynchrone Einspritzung vorgestellt.

Stromregelung

Eine Verbesserung des Ein- bzw. Ausschaltverhaltens der Einspritzdüse lässt sich durch den Einsatz einer Stromregelung erzielen. Ziel dabei ist ein schnelles Öffnen und somit eine schnelle, stationär genaue Ausregelung des Stroms. Die ermittelten Sprungantworten sind in Bild 5.10 dargestellt. Dass es sich bei der Einspritzdüse um ein elektromagnetisch betätigtes Ventil handelt, erklärt die nichtlinearen Stromverläufe sowohl im Ein- als auch im Ausschaltverhalten. Bei den Schaltvorgängen ändert sich die Induktivität und beeinflusst den Strom.

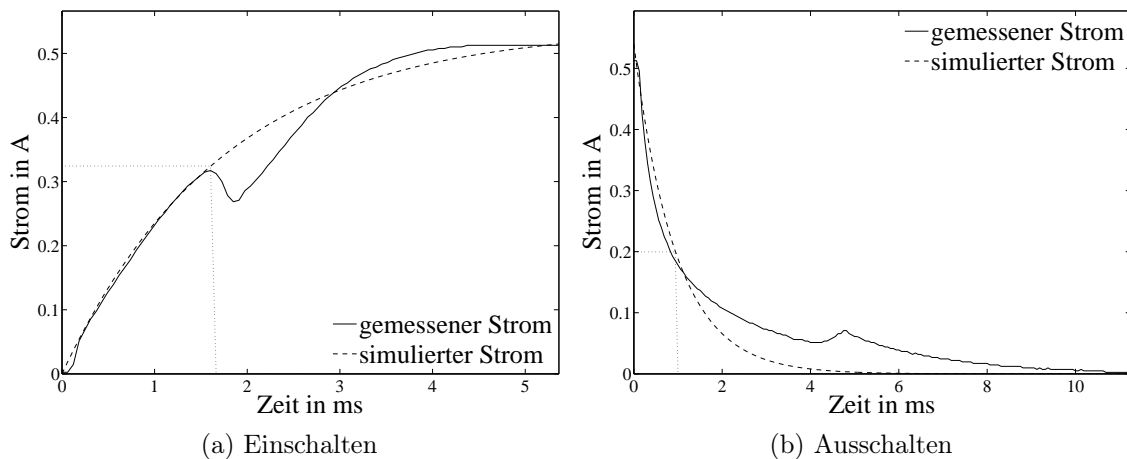


Bild 5.10: Sprungförmige Anregung der Einspritzdüse ohne Regler

Für die Auslegung des unterlagerten Stromreglers wird von einem PT_1 -Modell ausgegangen. Die identifizierten Systeme ergeben sich zu:

$$G_{ein}(s) = \frac{0,45}{T_{ein} s + 1} \quad , \text{ mit } T_{ein} = 1,75 \text{ ms}$$

$$G_{aus}(s) = \frac{0,45}{T_{aus} s + 1} \quad , \text{ mit } T_{aus} = 0,95 \text{ ms}$$

Dass sich für die einzelnen Schaltvorgänge die Zeitkonstanten unterscheiden, wird bei der Reglerimplementierung durch eine Umschaltung der Reglerparameter für das Ein- bzw. Ausschalten berücksichtigt. Zusätzlich erfolgt eine symmetrische Ansteuerung der Einspritzdüse,

um das Ausschalten zu beschleunigen. Bild 5.11 zeigt den Stromverlauf für das Ein- und Ausschalten. Die Schaltdauer der Düse wird von über 3 ms auf unter 0,5 ms verringert.

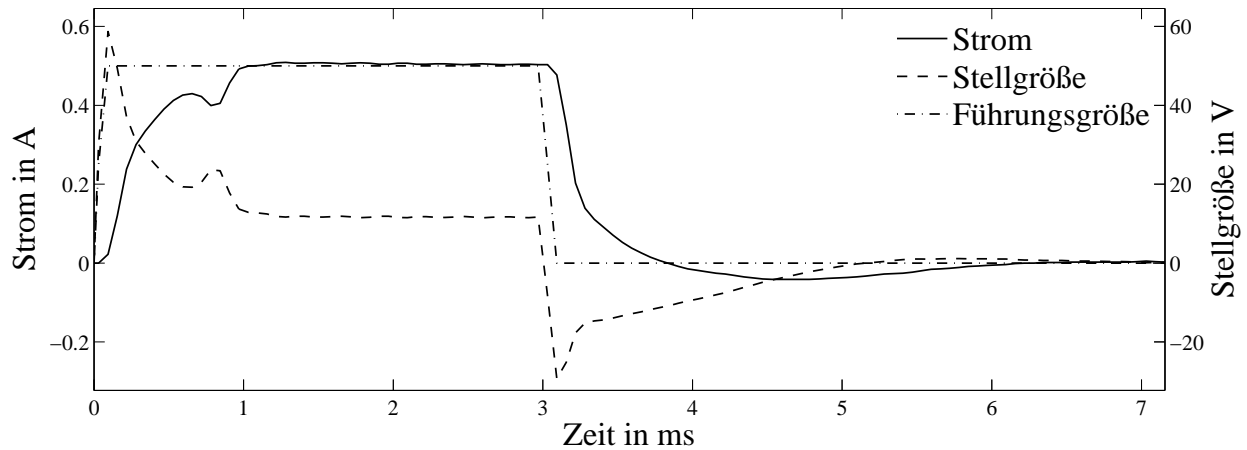


Bild 5.11: Sprungantwort der Einspritzdüse mit Regler

Kammersynchrone Einspritzung

Um sowohl die eingebrachte Luft als auch das Öl gleichmäßig zu transportieren, wird die Einspritzung mit der Pumpendrehzahl synchronisiert. Das Pumpengehäuse mit den zehn Kammern ist in Bild 5.4b abgebildet. Ein Induktionssensor erfasst extern berührungslos die Kammerpositionen, aus denen im Anschluss der Reglertakt (Sync.) für die Stromregelung erzeugt wird. Der Regelkreis mit dem Sync.-Impuls ist in Bild 5.12 dargestellt. Die Drehzahl der Pumpe ist konstant, die Kammerimpulse erfolgen circa alle 14 ms. Die Einschwingdauer der Einspritzdüse beträgt 0,5 ms. Es wird daher eine minimale Einschaltdauer von 2 ms, die einem Ansteuerungsgrad α_A von 10 % entspricht, gefordert, so dass keine Synchronisierung auf jeden Kammerimpuls bei einem Ansteuerungsgrad von 90 % möglich ist, siehe Bild 5.9.

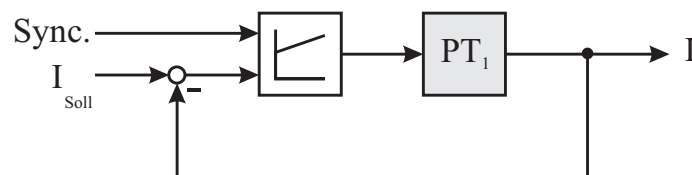


Bild 5.12: Synchronisation der Regelung auf die Kammern

Um einen möglichst großen Stellbereich für den Luftgehalt zu erzielen, wird die Regelung nur auf jeden zweiten Kammerimpuls synchronisiert. In Bild 5.13 sind die Kammerimpulse und das erzeugte Reglersynchronisierungssignal, sowie die Stromverläufe für einen Ansteuerungsgrad α_A von 10 % bzw. 90 %, aufgetragen.

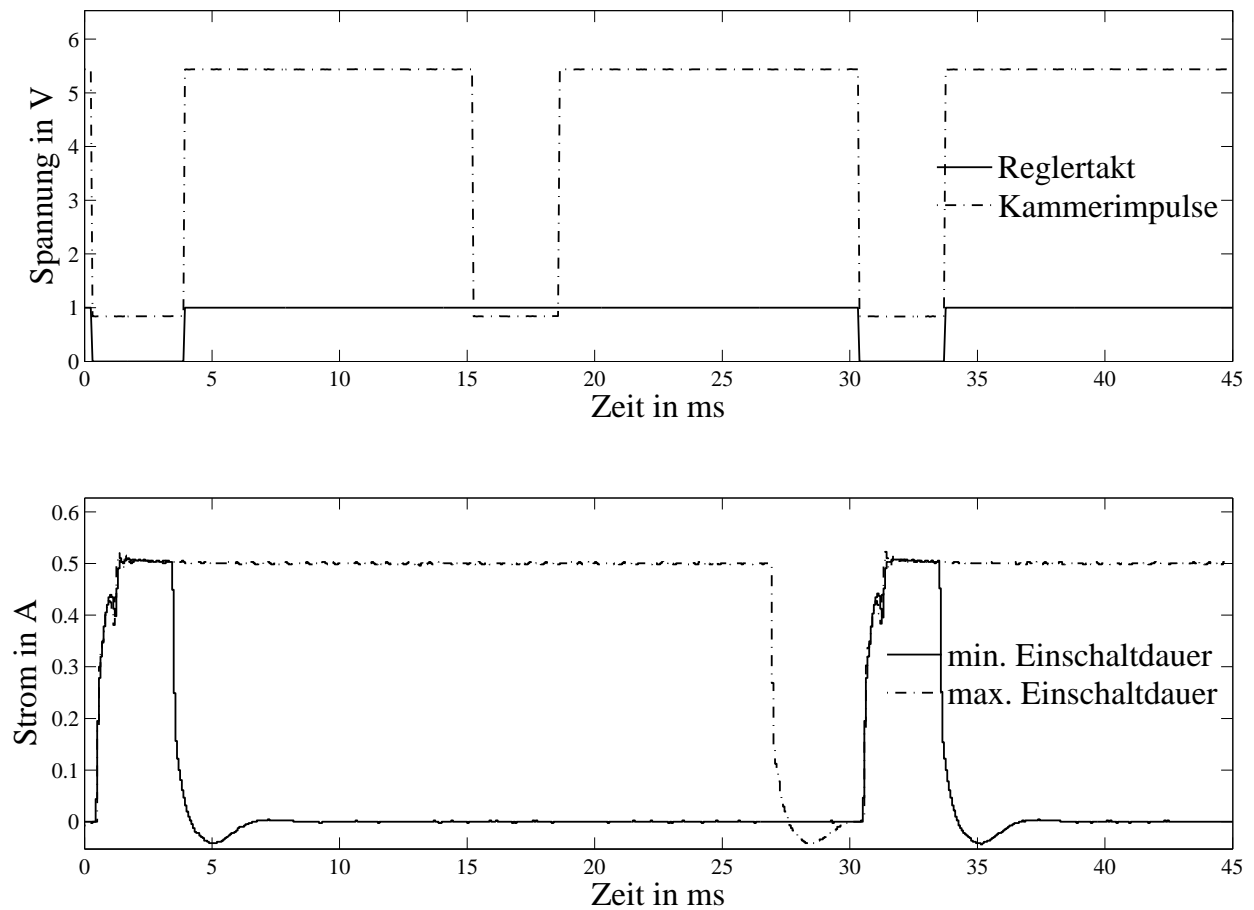


Bild 5.13: Regelung der Einspritzdüse

6 Modellbildung, Identifikation und Regelung

Für die Nachbildung auch dieser realen Systeme bieten sich die Prozessmodelle nach Wiener und Hammerstein aus Abschnitt 3.2.5 an. Die grundlegenden Probleme bei der Modellbildung lassen sich wie folgt zusammenfassen: Zuerst muss ein geeignetes Streckenmodell gewählt und anschließend müssen die Parameter bestimmt werden. Als Modellstruktur wird ein Hammerstein-Prozess-Modell wie in Bild 6.1 dargestellt verwendet.

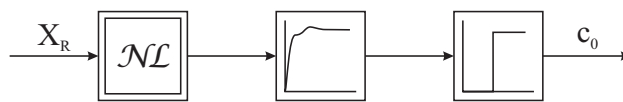


Bild 6.1: Hammerstein-Prozessmodell für den Prüfstand

Um Einflüsse auf den Luftgehalt durch Temperatur- oder Druckschwankungen zu minimieren, werden diese geregelt, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben. Dabei wird die Ölprobe auf eine Temperatur von 50 °C geheizt und der Druck auf 2 MPa geregelt. Mit diesen Randbedingungen wird das Übertragungsverhalten des Luft-Öl-Gemischs durch sprunghörmige Anregungen aufgenommen. Dabei werden verschiedene Sprunghöhen verwendet, da es sich um ein nichtlineares System handelt, bei dem aktiv Luft beigemischt wird. Die Abgabe der Luft kann nicht aktiv unterstützt werden.

6.1 Messungen zur Identifikation

In Bild 6.2 ist eine Messung zur Identifikation mit den unterschiedlichen Anregungsamplituden sowie dem dazugehörigen Druckverlauf dargestellt. Es wird die Reihenfolge der Sprungamplituden aus Abschnitt 3.2.5 verwendet. Da hier die PWM mit einem Ansteuerungsgrad α_A zwischen 10 % und 90 % betrieben wird, bedeutet das, dass Anregungen auf 9 V begrenzt

werden. Der Druck beträgt über den gesamten Messzeitraum 2 MPa, außer bei Einschwing- und Schaltvorgängen der Luftzufuhr.

Bei diesem Öl kann der Luftgehalt in einem Bereich von 3 Vol.-% bis 7 Vol.-% eingestellt werden. Durch die Begrenzung des Messbereiches der differentiellen Kapazitätsbestimmung auf 4 pF kann kein höherer Luftgehalt ermittelt werden. Erstmals tritt eine Begrenzung nach circa $t = 3400$ s auf. Für die Regelung des Luftgehaltes auf 5 Vol.-% sind sowohl der Stell- als auch der Messbereich ausreichend, der Druck bleibt über den Messzeitraum konstant.

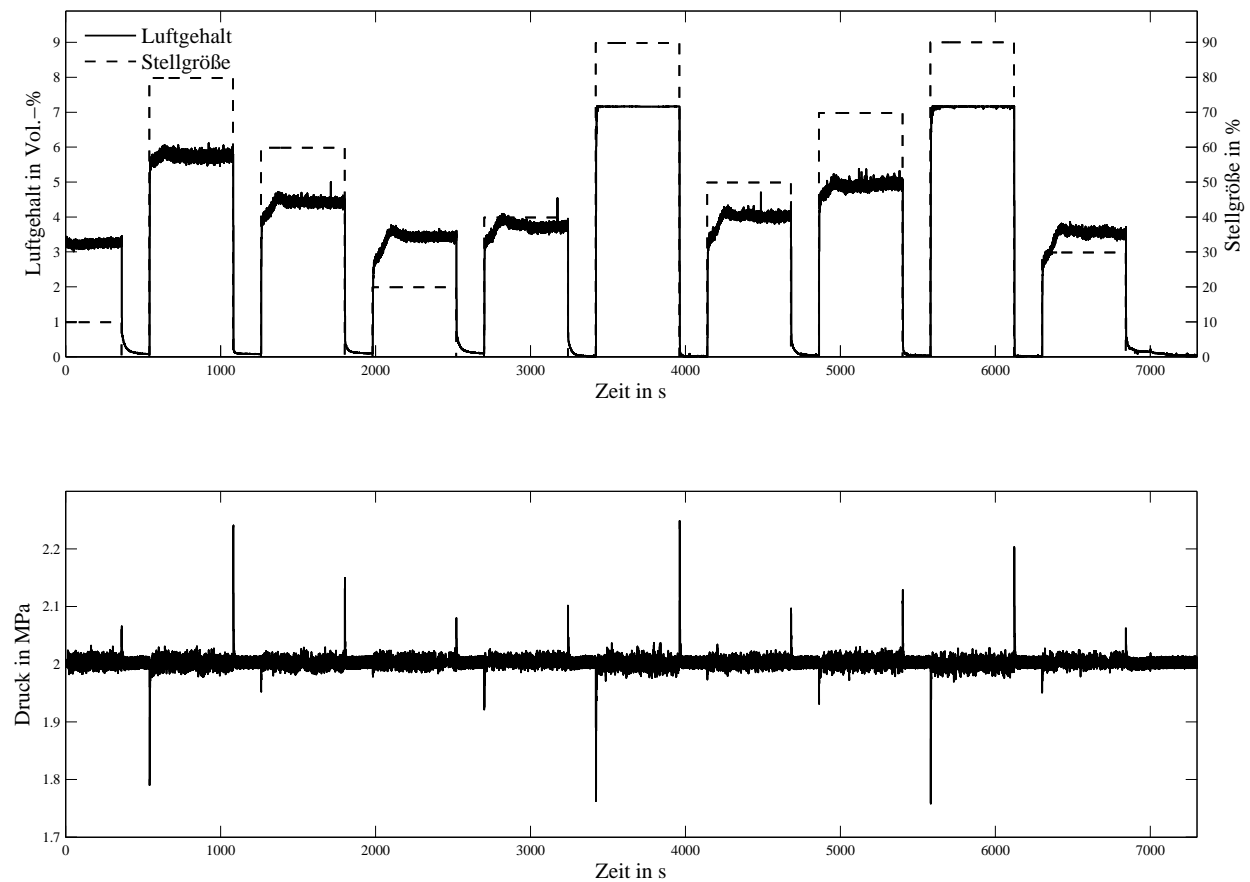


Bild 6.2: Luftgehalts- und Druckverlauf einer Identifikation

Zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit des Luftgehaltes werden drei Luftgehaltsverläufe dieser Messung mit denen einer weiteren Messung verglichen. Die Verläufe des Luftgehaltes sind in Bild 6.3 dargestellt. Für die jeweiligen Anregungen stimmen die Luftgehaltsverläufe sehr gut überein. Der Luftgehalt lässt sich mit diesem Prüfstand reproduzierbar einstellen und messen. Somit ist eine Regelung des Luftgehaltes prinzipiell möglich.

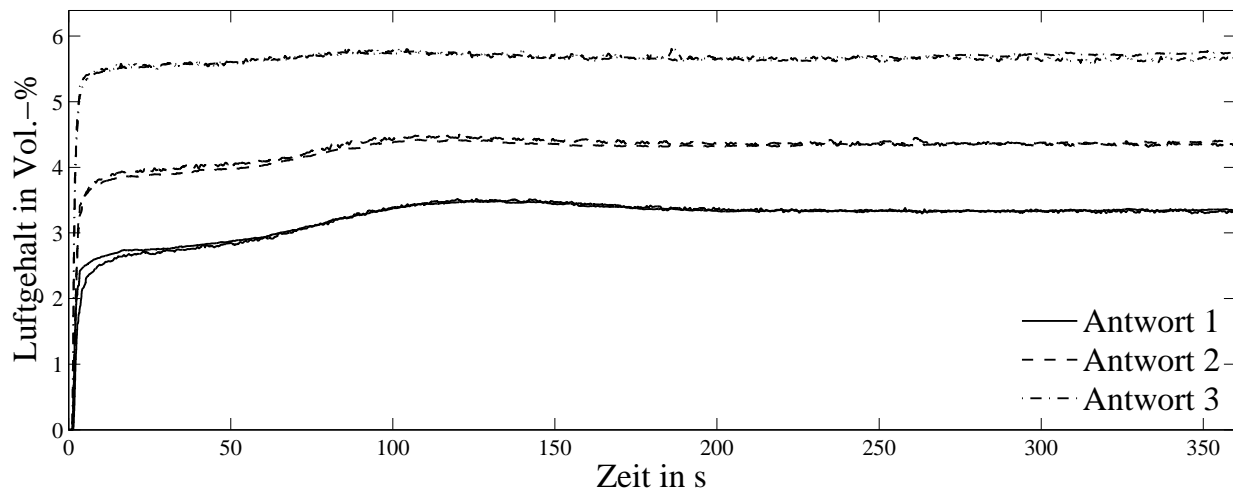


Bild 6.3: Sprungantworten bei verschiedenen Anregungsamplituden

6.2 Modellbildung

Eine Parameteridentifikation verlangt a priori die Wahl eines geeigneten Modells. Das System lässt sich durch ein Modell, bestehend aus einer Totzeit, einer Nichtlinearität und einem schwingungsfähigen System, beschreiben. Für die Modellbildung und Parameteridentifikation werden die Systemantworten für sprungförmige Anregungen zuerst unter der Annahme betrachtet, dass es sich um ein lineares System handle. Zusätzlich wird von einer systembedingten konstanten Totzeit für alle Systemantworten ausgegangen.

In Bild 6.4 sind der schnelle Anstieg sowie die Überhöhung nach circa $t = 120\text{ s}$ deutlich erkennbar. Erklären lassen sich beide Effekte sowohl durch die Luftaufnahme als auch durch die Pumpe.

Die erste Ursache liegt im Einbringen der Luft. Im Bereich bis $t \leq 30\text{ s}$ wird zu dem luftfreien Öl aus dem Behälter eine gewisse Luftmenge eingebracht. Diese erzeugt ein homogenes Luft-Öl-Gemisch. Der Luftgehalt steigt schnell an. Da nur eine begrenzte Menge an luftfreiem Öl vorrätig ist, das mit dem Luft-Öl-Gemisch vermengt wird, steigt der Luftgehalt ab $t = 30\text{ s}$ langsamer an.

Die zweite Ursache liegt in der Pumpe begründet. Zu Beginn fördert diese ausschließlich luftfreies Öl. Mit steigender Laufzeit wird zunehmend Luft-Öl-Gemisch gepumpt. Die Pumpe ist für die Förderung von Ölen ausgelegt, die tatsächlich geförderte Gemischmenge kann davon abweichen und ist nicht bekannt. Der sich einstellende Gleichgewichtszustand wird somit vom Luftabscheidungsvermögen des Öls, der eingebrachten Luftmenge und der geförderten Gemischmenge bestimmt.

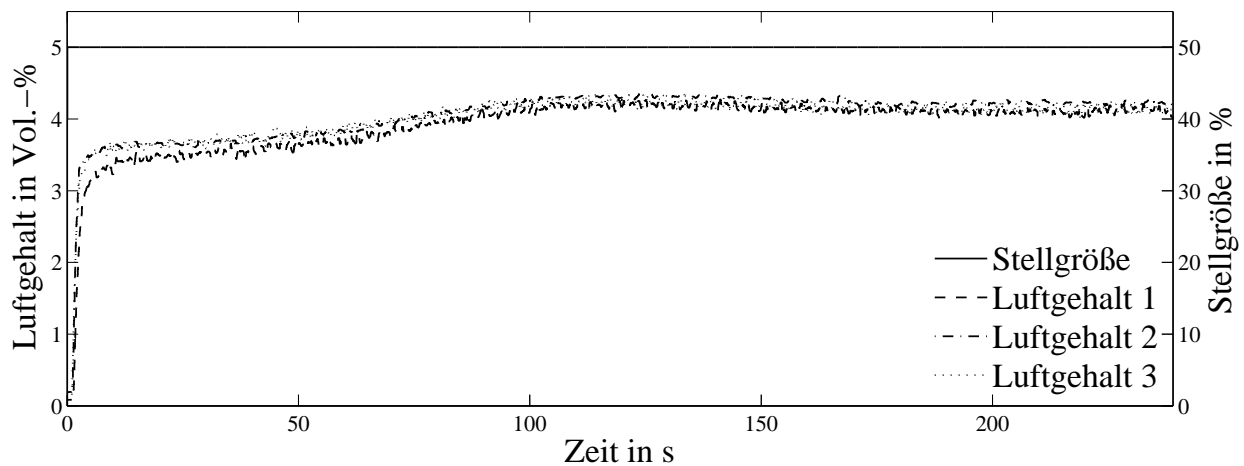


Bild 6.4: Verschiedene Messungen mit gleicher Anregung

Ausgehend vom Prozessmodell wie in Bild 6.1 dargestellt, werden die Systemparameter bestimmt. Wird das System durch ein Modell höherer Ordnung nachgebildet, so ist der Informationsgehalt der Anregung aus regelungstechnischer Sicht minimal und für die Parameteridentifikation und die Reglerauslegung nicht zielführend.

Daher werden die Modellparameter durch die Minimierung¹ einer Funktion mit mehreren realen Variablen ohne Nebenbedingungen bestimmt. Hierbei wird als Funktion der quadratische Fehler zur Bewertung herangezogen. Das Verfahren startet mit gegebenen Parametern und versucht durch Minimierung des quadratischen Fehlers zwischen Streckenverlauf und Modellantwort passendere Parameter zu ermitteln. Problematisch dabei ist die Wahl von geeigneten Startparametern, damit das Verfahren konvergiert. Die Bestimmung der Startparameter erfolgt daher mehrstufig. Zuerst wird die Systemantwort in zwei zeitliche Bereiche unterteilt, die getrennt voneinander identifiziert werden. Da für lineare Systeme das Superpositionsprinzip gilt, werden anschließend beide Teilsysteme vereint.

Für ein lineares Modell lässt sich der Verlauf der Sprungantwort durch eine Parallelschaltung aus einem schnellen PT_1 -Glieder, einem langsamen schwingungsfähigen PT_2 -Glieder und einer Totzeit nachbilden. Bild 6.5 zeigt das lineare Modell.

Für die folgenden Betrachtungen werden die Totzeit vernachlässigt und beide Teilsysteme einzeln identifiziert.

¹fminsearch aus MATLAB 7.2

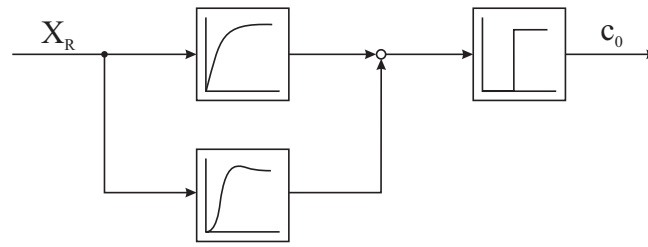


Bild 6.5: Lineares Modell

Es ergeben sich somit die folgenden Übertragungsfunktionen:

$$G_{1,ident}(s) = \frac{V_1}{T_1 s + 1} \quad (6.1)$$

$$G_{2,ident}(s) = \frac{V_2}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2D}{\omega_0} s + 1} \quad (6.2)$$

Mit den identifizierten Parametern der Teilübertragungsfunktionen wird die Gesamtübertragungsfunktion analog zu Bild 6.5 aufgestellt. Mit den gewonnenen Startparametern wird die Identifikation für das Gesamtsystem erneut durchgeführt. Mit der bekannten Totzeit ergibt sich für eine Anregung folgende Übertragungsfunktion:

$$G_{ident}(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \cdot e^{-T_R s} \quad (6.3)$$

Ein Vergleich von drei gemessenen Sprungantworten mit den Luftgehaltsverläufen für die Näherung des Systems nach Gleichung 6.3 ohne Berücksichtigung der Totzeit ist in Bild 6.6 dargestellt. Die Modellantworten stimmen für die jeweilige Anregung sehr gut mit der der Strecke überein, so dass mit Gleichung 6.3 ein lineares Teilsystem bestimmt ist.

Im Folgenden wird das Streckenmodell für eine einzelne Anregung beispielhaft vorgestellt, dabei ergibt sich das lineare System zu:

$$G_{ident}(s) = \frac{474,20 s^2 + 14,35 s + 0,78}{816 s^3 + 812,20 s^2 + 31,02 s + 1} \cdot e^{-1,2 s} \quad (6.4)$$

Wird das System mit und ohne Totzeit im Bodediagramm verglichen, so ist ersichtlich, dass die Totzeit die Regelbarkeit bestimmt. Das Bodediagramm für das System nach Gleichung 6.4 ist in Bild 6.7 dargestellt. Eine Verbesserung der Regelbarkeit ist nur durch Minimierung der Totzeit zu erreichen, was mit bautechnischen Veränderungen des Prüfstandes einhergeht und somit nicht möglich ist.

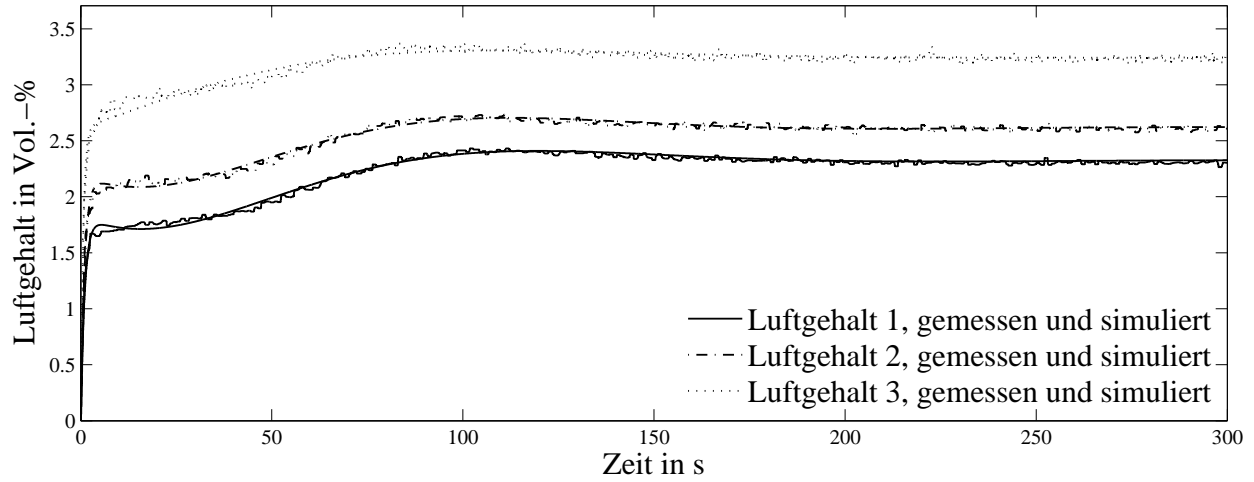


Bild 6.6: Sprungantworten des Modells und des Systems

Da die Totzeit maßgeblich für die Regelbarkeit verantwortlich ist, wird im folgenden Ansatz die Ordnung des System reduziert. So vereinfacht sich die Identifikation sowohl des linearen als auch des nichtlinearen Teilsystems. In den Bildern 6.3 und 6.6 ist zu erkennen, dass sich mit steigender Anregung das Überschwingverhalten des Systems immer weiter verringert und sich die Strecke dann vereinfacht durch das schnellere PT_1 -System mit einer Totzeit beschreiben lässt. Der Einfluss des sehr langsamen PT_2 -Systems wird dann als Störung aufgefasst. Das System lässt sich dann zu

$$G_{PT_1}(s) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} \cdot e^{-T_T s} = \frac{0,59}{0,97 s + 1} \cdot e^{-1,2 s} \quad (6.5)$$

angeben. Da für die meisten Anregungen um den Arbeitspunkt die Zeitkonstanten annähernd gleich sind, wird für die PT_1 -Näherung mit einer gemittelten Zeitkonstante gerechnet. Die ermittelten Streckenzeitkonstanten sind in Bild 6.8 dargestellt. Dieser Betrags- bzw. Phasenverlauf ist ebenfalls in Bild 6.7 aufgetragen. Bis auf die Abweichung bei kleinen Frequenzen stimmen die Verläufe für Betrag und Phase mit denen des Modells mit höherer Ordnung überein.

Bild 6.9 zeigt den Verlauf der Streckenverstärkung. Die Anpassung der Verstärkungsfaktoren wird über die Nichtlinearität \mathcal{NL} realisiert. Sie lässt sich für dieses Beispiel durch das folgende Polynom hinreichend genau annähern:

$$\mathcal{NL}(x) = c_1 x^4 + c_2 x^3 + c_3 x^2 + c_4 x + c_5 \quad (6.6)$$

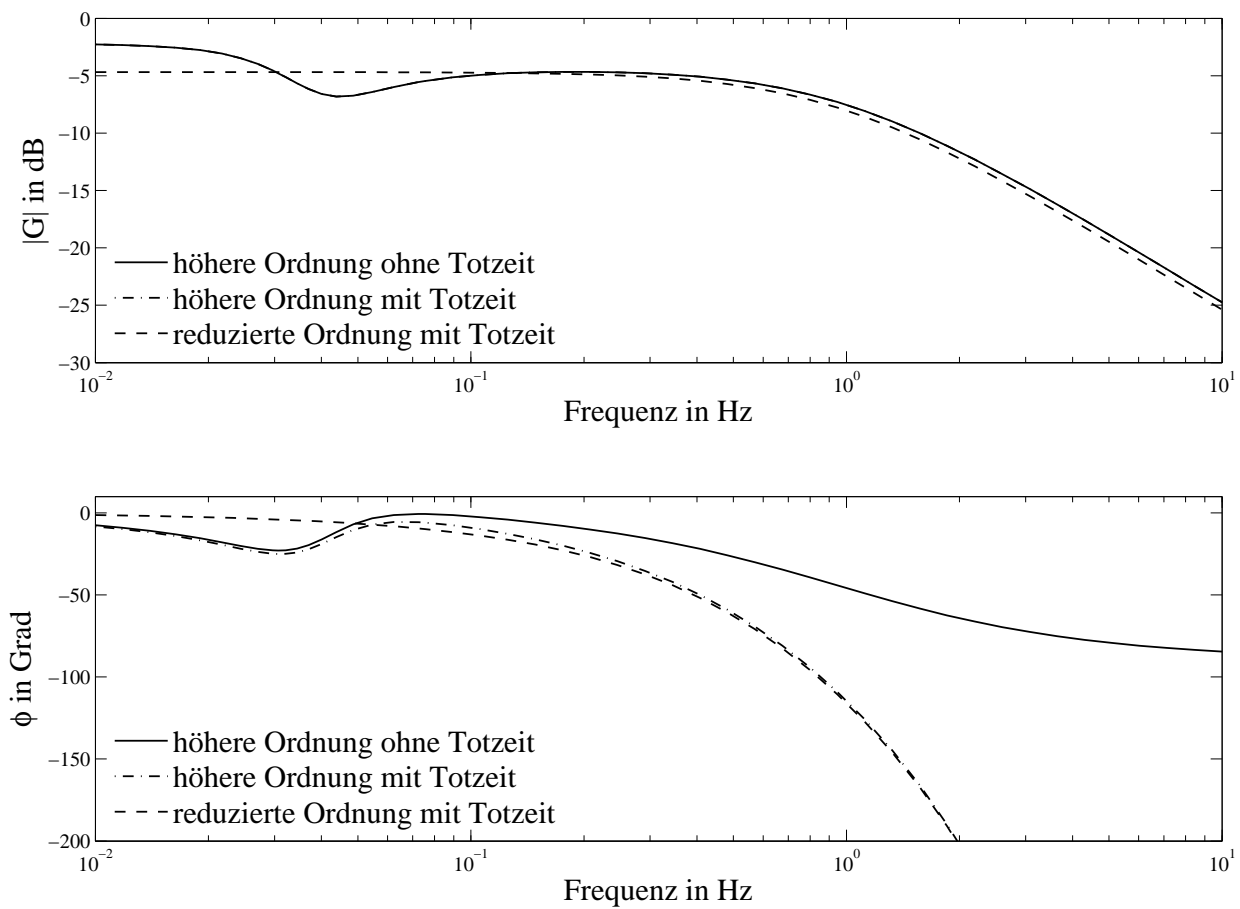


Bild 6.7: Bodediagramm des Teilmodells mit und ohne Totzeit

Somit ergibt sich für die Reglerauslegung der lineare Teil der vereinfachten Übertragungsfunktion zu:

$$G_{sys}(s) = \frac{1}{T_E s + 1} \cdot e^{-T_T s} \quad (6.7)$$

Mit der bekannten Übertragungsfunktion $G_{sys}(s)$ ist eine hinreichend genaue Beschreibung der Luftaufnahme des Öls vorhanden, so dass im folgenden Abschnitt die Regelung des Luftgehaltes vorgestellt wird.

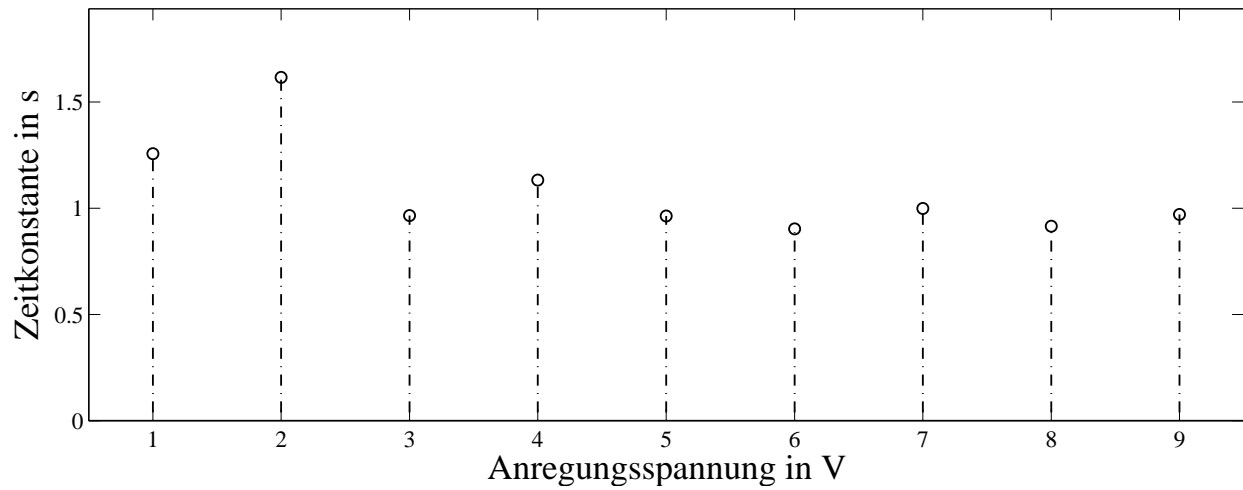


Bild 6.8: Zeitkonstanten

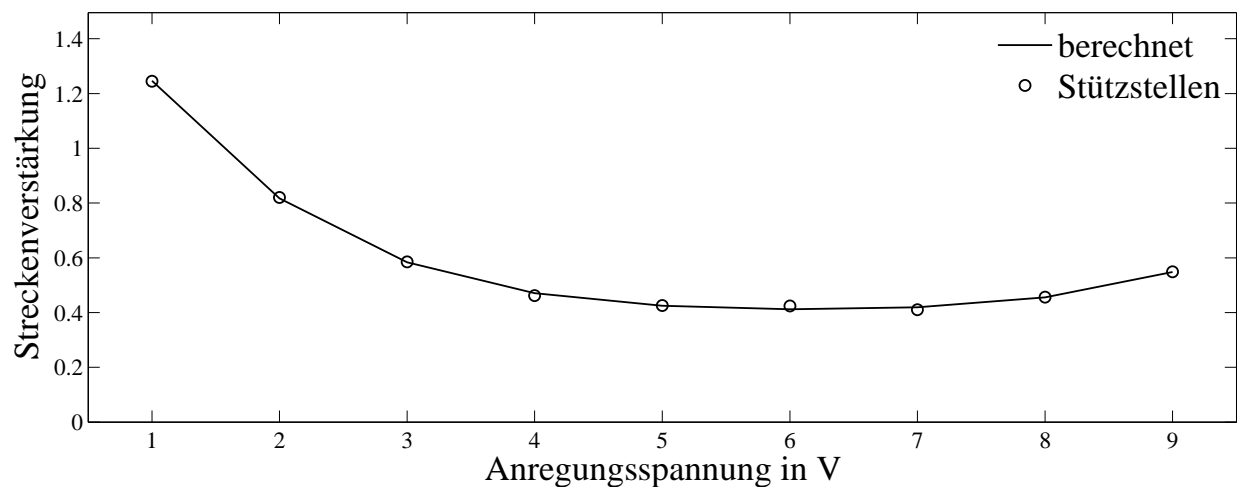


Bild 6.9: Verstärkungsfaktoren

6.3 Luftgehaltsregelung

Mit den bestimmten Streckenparametern werden im Folgenden die verschiedenen Regelungskonzepte vorgestellt. Dabei wird ausschließlich von der vereinfachten Modellstruktur aus Gleichung 6.7 ausgegangen. In den Abläufen der jeweiligen Verschäumungsvorgänge der im Weiteren vorgestellten Konzepte gibt es keine Unterschiede. Vorbereitend wird das zu prüfende Öl auf 50 °C temperiert und der Luftgehalt soweit möglich auf 0 Vol.-% reduziert. Das Verschäumen geschieht anschließend zweistufig. Dabei wird der Druck auf 2 MPa geregelt, ab einem Druck von 1,7 MPa wird die Luftgehaltsregelung aktiviert und der Schaumaufbau kann beginnen.

Diese Reihenfolge ist einzuhalten, um einen Luftgehaltsanstieg zu vermeiden. Bild 6.10 zeigt den Einfluss des Streckendrucks auf den Luftgehalt.

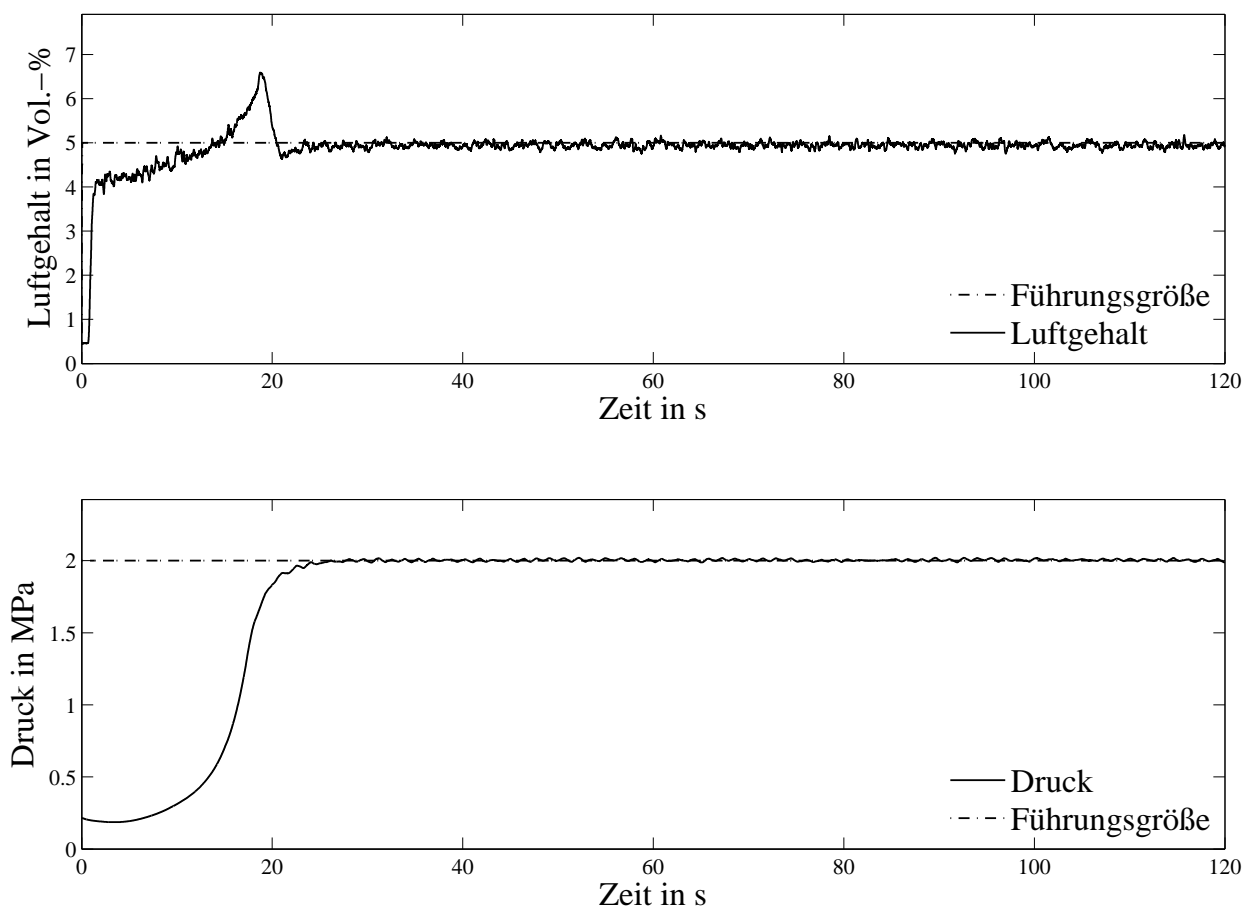


Bild 6.10: Einfluss des Streckendrucks auf den Luftgehalt

Da eine aktive Luftentnahme nicht möglich ist und der Druck sehr schnell ansteigt, ist ein

Überschwingen des Luftgehaltes nicht zu vermeiden.

Der Einfluss des kurzzeitig überhöhten Luftgehaltes auf die Schaumsäule kann mit diesem Aufbau nicht ausgewertet werden, da keine entsprechende Sensorik verbaut worden ist. Ziel dieses Aufbaus ist es, die bekannten Probleme des vorangegangenen Prüfstandes zu minimieren und zu zeigen, dass der Luftgehalt im Öl unter den gewünschten Randbedingungen geregelt werden kann.

6.3.1 PI-Regler

Zunächst wird die Regelung des Systems mit einem fest eingestellten PI-Regler vorgestellt. Dazu wird ausgehend vom reduzierten allgemeinen Modell aus Gleichung 6.7 die Näherung der Strecke für den gewünschten Arbeitspunkt aufgestellt. Anhand des Bodediagramms lassen sich die Reglerparameter bestimmen. In Bild 6.11 sind die Verläufe für die Luftgehaltsregelung für Öle der Typen Renolin B 15 VG 46 und Renolin MR 46 MC dargestellt. Am Einschwingverhalten lässt sich einerseits eine unterschiedliche Reglerauslegung und andererseits das unterschiedliche Luftabscheidevermögen der Öle erkennen.

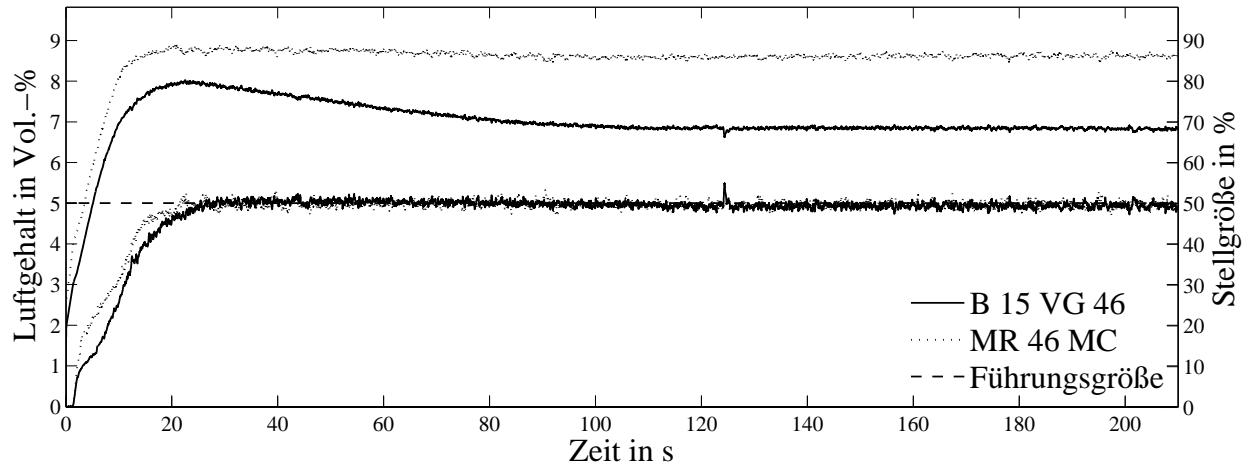


Bild 6.11: Luftgehaltsregelung mit einem fest eingestellten PI-Regler

Der Entwurf eines Reglers mit Hilfe des Kompensationsverfahrens ist bei Totzeitstrecken nicht anwendbar, was daran liegt, dass eine Totzeit grundsätzlich nicht kompensierbar ist [Föl94].

Über den gesamten Verschäumungszeitraum wird der Druck auf 2 MPa geregelt. Nach Erreichen der Druckschwelle wird der Luftgehalt ohne Überschwingen auf die gewünschten

5 Vol.-% ausgeregelt. Die Näherung der Strecke nach Abschnitt 6.1 sowie die daraus bestimmten Reglerparameter liefern ein sehr gutes Ergebnis.

6.3.2 Smith–Prädiktor

Die hier vorliegende Strecke weist eine systembedingte, konstante Totzeit auf. Durch den Einsatz des Smith–Prädiktors [Smi58] kann ein modellbasierter Regler entworfen werden. Dazu wird dem realen System ein Streckenmodell parallel geschaltet, das in ein totzeitbehaftetes und ein totzeitfreies System unterteilt ist. In Bild 6.12 ist die Struktur des Smith–Prädiktors dargestellt. Anhand des im Regler enthaltenen Modells kann dieser eine Vorhersage über den zukünftigen Regelgrößenverlauf \hat{c}_0 treffen. Die Reglerauslegung erfolgt anhand des totzeitfreien Systems. Als nachteilig bei dieser Regelung erweist sich, dass der Smith–Prädiktor überaus empfindlich auf Abweichungen zwischen Strecke und Modell reagiert, insbesondere bei der Totzeit.

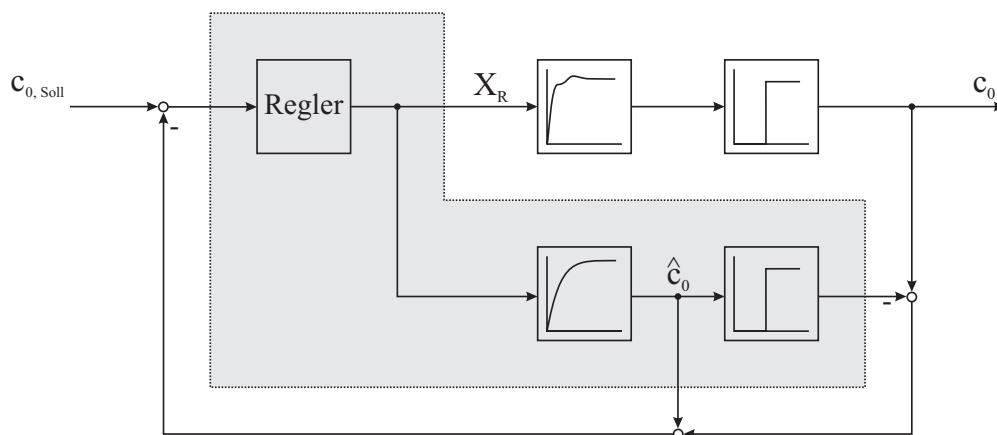


Bild 6.12: Smith–Prädiktor. Im Modell wird die schnelle PT_1 –Dynamik berücksichtigt, der Einfluss des PT_2 –Gliedes wird als Störung aufgefasst.

Für die Auslegung des I–Reglers wird von Gleichung 6.7 ausgegangen. Um eine gute Übereinstimmung des Smith–Prädiktors mit dem System zu erhalten, wird der Verstärkungsfaktor des totzeitfreien Streckenmodells in Abhängigkeit vom aktuellen Luftgehalt nachgeführt. Die Zeitkonstante und die Totzeit des Modells sind konstant. Ferner wird dem realen System der reziproke Verstärkungsfaktor vorgeschaltet. In Bild 6.13 ist die resultierende Struktur dargestellt.

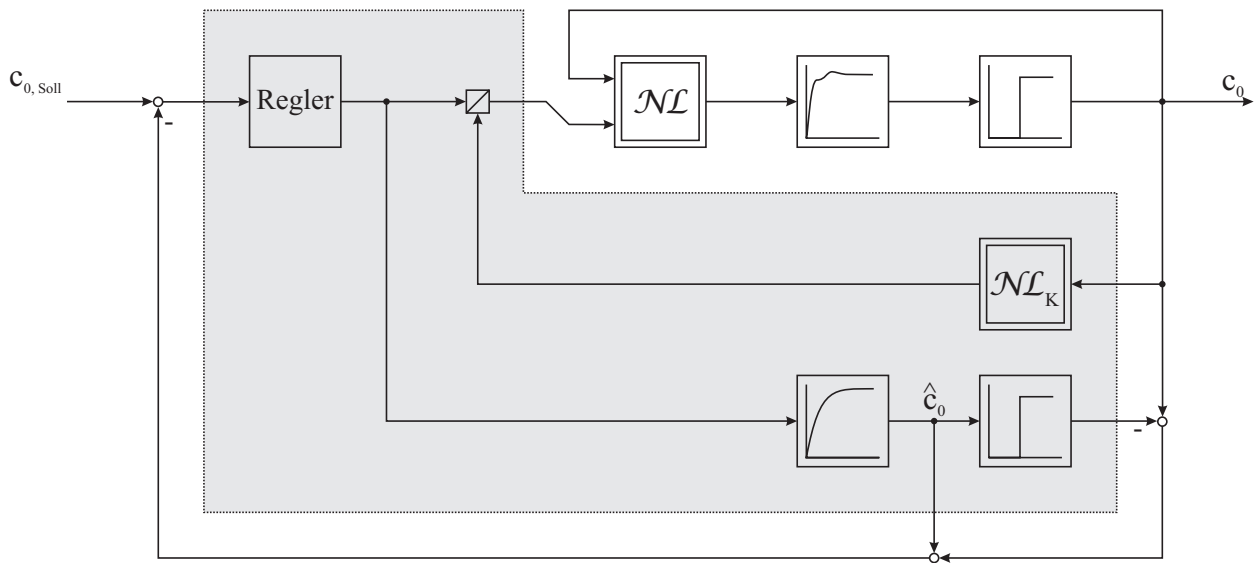


Bild 6.13: Smith-Prädiktor mit Arbeitspunktanpassung

Für den geschlossenen Kreis ergibt sich folgende Übertragungsfunktion:

$$G_g(s) = \frac{1}{T_R T_E s^2 + T_R s + 1}$$

Mit T_R ist die Zeitkonstante des Integralreglers und mit T_E die Ersatzzeitkonstante der Strecke angegeben. Durch einen Koeffizientenvergleich mit einem PT₂-Glied kann durch Dämpfungsvorgabe die Reglerzeitkonstante zu

$$T_R = 4 D^2 T_E$$

bestimmt werden. Da es sich um ein nichtlineares System handelt, ist bei sprunghörmiger Anregung a priori keine Zuordnung aus Dämpfungsfaktor und gewünschtem Einschwingverhalten möglich, wie in Abschnitt 3.2.7 gefordert. So kann ein Luft-Öl-Gemisch bei einer Reglerauslegung mit Dämpfungsvorgabe von eins das gleiche Einschwingverhalten aufweisen wie ein lineares System bei einer Vorgabe von $\frac{1}{2}\sqrt{2}$. Um ein Überspringen des Endwertes im Luftgehalt zu vermeiden, kann stattdessen ein Führungsfilter mit einer Anstiegsbegrenzung verwendet werden (Abschnitt 6.3.3).

Beim Öl vom Typ Renolin B 15 VG 46 wurde der Smith-Prädiktor mit einem PT₁-Modell, wie in Bild 6.13 dargestellt, mit drei unterschiedlichen Dämpfungsvorgaben eingesetzt. Die Linearisierung basiert dabei auf dem gemessenen Luftgehalt, da sich die Streckenverstärkung in Abhängigkeit des Luftgehaltes verändert und eine Abstützung auf die Stellgröße fehlerbehaftet ist.

Der Druck wurde für die drei durchgeführten Messungen auf 2 MPa geregelt. In Bild 6.14 sind die Luftgehalts- und Druckverläufe dargestellt. Die Druckanstiege und -verläufe sind für alle Messungen identisch. Beim Luftgehalt unterscheiden sich die drei Messungen nur im Luftgehaltsanstieg und somit in der Einschwingdauer. Die Überschwingweite ist bei den drei Messungen kleiner 0,3 Vol.-%. Für die drei gewählten Dämpfungen ergeben sich das geforderte Einschwingverhalten und der stationäre Endwert.

Das im Smith-Prädiktor hinterlegte Streckenmodell bildet das reale System hinreichend genau ab, so dass die Regelungen des Luftgehaltes alle ein sehr gutes Ergebnis liefern.

Wird anstelle des I-Reglers ein PI-Regler eingesetzt, so ergibt sich für die Zeitkonstante des Reglers die Ersatzzeitkonstante der Strecke. Mit dem Verstärkungsfaktor des Reglers wird das Einschwingverhalten des resultierenden PT_1 -Gliedes wie gewünscht eingestellt. In Bild 6.15 sind zwei Verläufe dargestellt. Beim ersten Verlauf ist der Regler so ausgelegt, dass sich ein schnelles PT_1 -System ergibt. Der Luftgehalt schwingt aufgrund der Nichtlinearität und der Kopplungseffekte des Drucks kurzzeitig über. Wird der Regler langsamer ausgelegt, so ergibt sich der zweite Verlauf. Der Luftgehalt steigt langsamer an und erreicht den Endwert ohne Überschwingen. Der Druck wird nicht durch das Einbringen der Luft beeinflusst. Das Ergebnis des zweiten Reglers wird als sehr gut bewertet, da nicht nur das geforderte Einschwingverhalten, sondern auch stationäre Genauigkeit vorhanden sind.

Die Nutzung eines Smith-Prädiktors mit PI-Regler ist prinzipiell möglich, für die Annahme aus Gleichung 6.7 und den Verläufen aus Bild 6.14 ist aber ein I-Regler ausreichend.

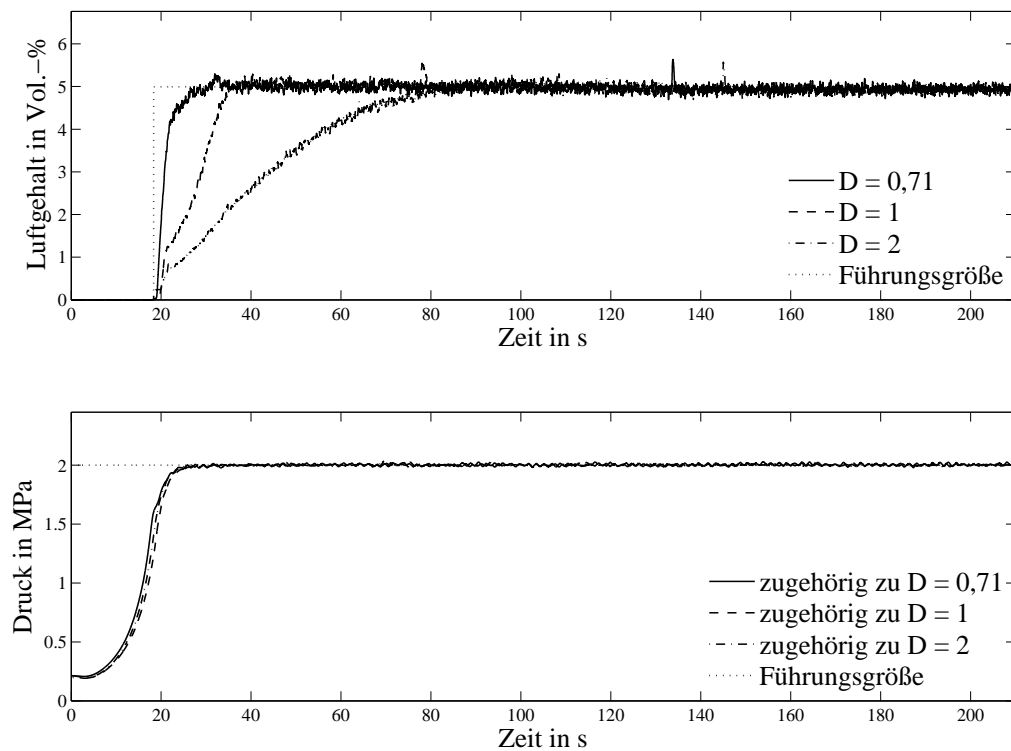


Bild 6.14: Luftgehaltsregelung mit Smith-Prädiktor (I-Regler)

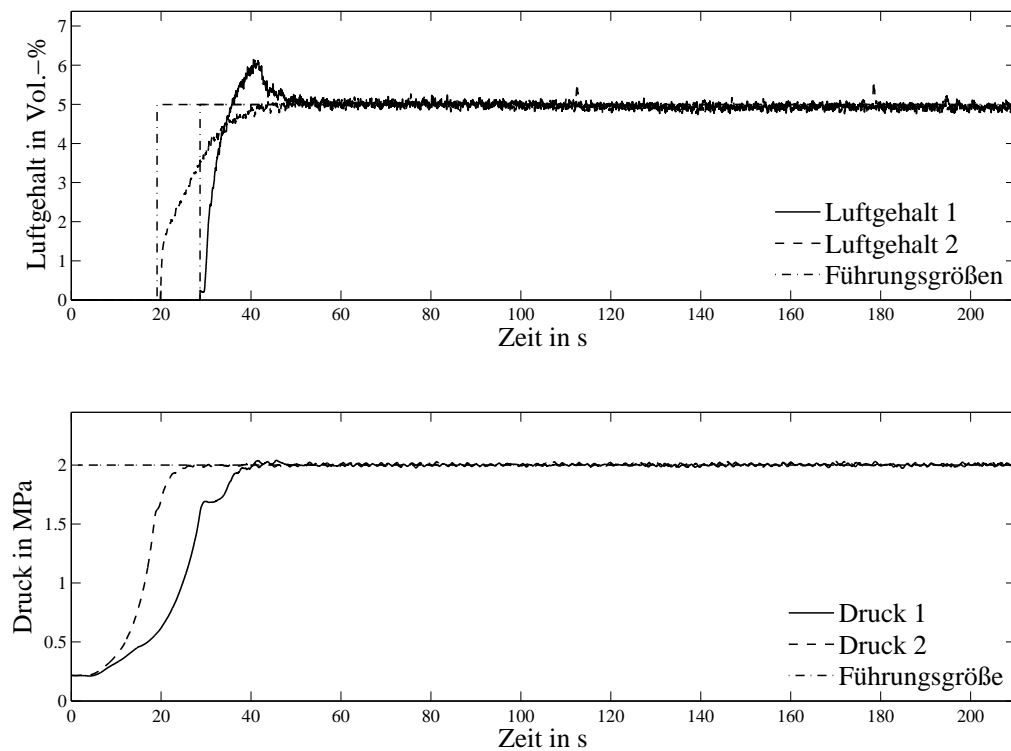


Bild 6.15: Luftgehaltsregelung mit Smith-Prädiktor (PI-Regler)

6.3.3 Smith–Prädiktor mit Führungsfilter

Bei einer sprungförmigen Anregung ist es möglich, dass der Luftgehalt beim Einschwingen durch eine zu geringe Dämpfung stark überschwingt. Um dieses zu vermeiden, wird durch den Einsatz eines Führungsfilters (Bild 6.16) die Führungsgrößenvorgabe nicht sprungförmig, sondern rampenförmig auf das System geschaltet, wie es in Abschnitt 3.2.7 beschrieben ist. Dadurch soll eine Verbesserung des Einschwingverhaltens und eine gleiche Einschwingdauer für alle Öle erzielt werden.

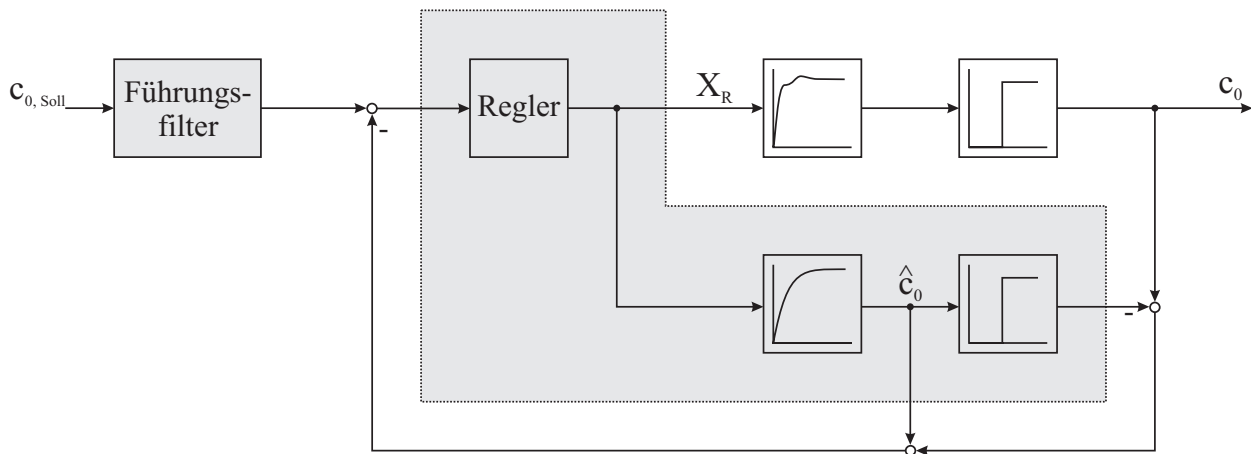


Bild 6.16: Smith–Prädiktor mit Führungsfilter

Für das Öl vom Typ Liebherr HVI sind zwei Führungsfilter mit unterschiedlicher Anstiegsrate implementiert und getestet worden. Beim ersten Führungsfilter steigt der Sollwert über $t = 60\text{ s}$ an, beim zweiten erfolgt die Sollwertvorgabe über $t = 120\text{ s}$. Das Freigeben der Luftgehaltsregelungen erfolgt bei Erreichen eines Drucks von $1,7\text{ MPa}$. Die Luftgehalte und die dazugehörigen Druckverläufe sind in Bild 6.17 dargestellt.

Die Graphen der Druckverläufe sind nicht zu unterscheiden. Beim Luftgehalt sind für $t \geq 20\text{ s}$ und $t \leq 40\text{ s}$ die in Abschnitt 6.2 beschriebenen schnellen PT_1 -Verläufe zu erkennen. Durch die PWM-Ansteuerung der Einspritzdüse wird eine konstante Luftmenge ins Öl eingebracht. Sobald die Führungsgröße die Regelgröße überschreitet, wird die einzubringende Luftmenge durch die Regelung erhöht. Anschließend folgt der Luftgehalt der Vorgabe und erreicht die Führungsgröße ohne zu überschwingen. Der Luftgehalt verlässt den Toleranzbereich von $\pm 0,5\text{ Vol.}\%$ nicht.

Der Einsatz beider Führungsfilter wirkt sich zum einen positiv auf das Einschwingverhalten des Luftgehaltes aus, zum anderen kann die Anstiegszeit vorgegeben werden. Die Luftgehaltsregelung wird insgesamt als gut bewertet.

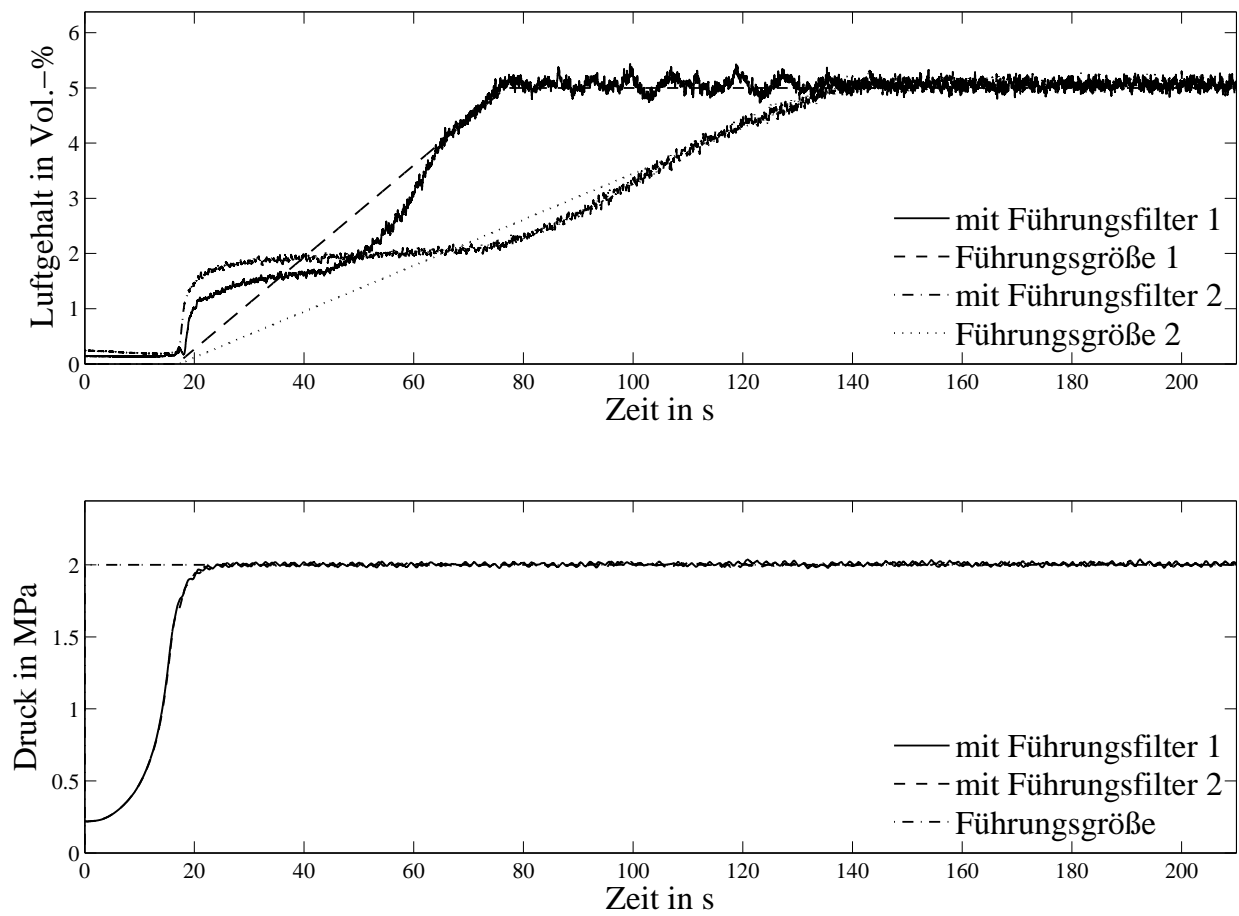


Bild 6.17: Luftgehaltsregelung mit Smith-Prädiktor und Führungsfilter

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Bestimmung des Luftabscheidevermögens von Ölen bei mobilen Arbeitsmaschinen ist der Anwendungsfall im Labor praxisnah mit dem Laborgerät nachgebildet worden. Durch den automatisierten Ablauf und eine anschließende computergestützte Auswertung hat sich das Luftabscheidevermögen von Ölen systematisch bestimmen lassen. Dazu ist eine Regelung implementiert worden, mit der ein gewünschter Luftgehalt geregelt werden können. Dies hat die ölonabhängige Einstellung erlaubt und kontrollierte Bedingungen für eine anschließende Schaumzerfallsanalyse garantiert.

Das Eindringen von Luft an Verbindungsstellen hat eine Verschlechterung der Regelbarkeit des Systems bewirkt. Daher ist der Hydraulikkreis des Laborgerätes abgedichtet worden, so dass die Verbindungen der Rohrleitungen luftdicht abgeschlossen haben. Ferner hat ein kontinuierlicher Lufttransport sichergestellt werden müssen, damit eine gleichmäßige Vermischung erfolgt ist und beim Entspannen ein homogener Schaum entstanden ist. Die Erfassung des Luftgehaltes hat möglichst schnell erfolgen müssen, da sich Totzeiten negativ auf die Regelbarkeit ausgewirkt haben.

Am Versuchsstand sind die Erkenntnisse aus Messungen mit dem Laborgerät umgesetzt worden. Dazu ist der Hydraulikkreis weitestgehend ohne konstruktionsbedingte Totvolumina aufgebaut worden. Die Ermittlung des Luftgehaltes ist durch eigens entwickelte kapazitive Sensorik erheblich beschleunigt worden. Weiterhin sind die Verbindungen der verschiedenen Schlauchleitungen für die Luftzufuhr und den Hydraulikkreis luftdicht ausgeführt worden, so dass keine Luft von außen ins Öl gelangen können. Die optimale Position des Einspritzpunktes und die zur Einbringung der Luft am besten geeignete Zuleitung sind systematisch ermittelt worden. Dabei hat sich das Einbringen der Luft durch eine Leitung mit einem Innendurchmesser von 0,5 mm und einer Länge von 5 cm als geeignet erwiesen. Damit sich keine Luft im Hydraulikkreislauf anlagern können und um eine gute Vermischung von Luft und Öl zu gewährleisten, ist das Einbringen der Luft in die Pumpenkammer der Flügelzellenpumpe erfolgt.

Der Systemdruck ist vom Öl, der Temperatur und dem Luftgehalt abhängig. Die Bestimmung des Luftabscheidevermögens ist bei konstanter Temperatur erfolgt, die durch ein Tem-

periergerät geregelt worden ist. Um ein Absinken des Drucks in der Rohrleitung durch das Einbringen von Luft zu verhindern, ist ein zusätzlicher eigenständiger Druckregler neben der Luftgehaltsregelung entwickelt und eingesetzt worden. Das Zusammenspiel dieser Regler hat eine reproduzierbare Luftgehaltsregelung gewährleistet.

Die Ansteuerung der Einspritzdüse zur Luftgehaltsregelung ist von einer Pulsfrequenzmodulation auf eine Pulsweitenmodulation mit kammersynchroner Einspritzung umgestellt worden. Zur Verringerung der Schaltdauer der Einspritzdüse hat die Ansteuerung nicht mehr durch Anlegen einer Spannung erfolgt, sondern durch einen unterlagerten Stromregelkreis.

Durch diese Maßnahmen ist die Dauer der Identifikation der Streckenparameter von über 7 h am Laborgerät auf circa 1,5 h beim Versuchsstand reduziert worden.

Die Reglerauslegung ist mit Hilfe von Bodediagrammen vorgenommen worden. Weiterhin ist ein Smith-Prädiktor verwendet worden. Da es sich um ein nichtlineares System gehandelt hat, hat keine Vorhersage über das Einschwingverhalten des Luftgehaltes getroffen werden können. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beim Schaumaufbau ist in einigen Fällen der Einsatz eines Führungsfilters in Form einer Steigungsbegrenzung für die Luftgehaltsregelung erforderlich gewesen, um die gleiche Beanspruchungsdauer der Öle zu gewährleisten.

Durch den Aufbau des Versuchsstandes hat auch der Luftgehalt von Ölen geregelt werden können, die am Laborgerät keine brauchbaren Ergebnisse geliefert haben.

Für einen zukünftigen Einsatz des Laborgerätes müssen die am Versuchsstand gewonnenen Ergebnisse darauf übertragen und dort verifiziert werden. Dazu sind konstruktive Modifikationen des Hydraulikkreislaufs und der Luftzufuhr nötig. Ferner können die Messdaten des im Laborgerät vorhandenen Luftgehaltssensors mit denen des entwickelten Sensors über ein geeignetes Modell fusioniert werden, so dass verlässliche und schnelle Aussagen über den Luftgehalt getroffen werden können. Da sich Wechselwirkungen zwischen dem Druck und dem Luftgehalt ergeben, muss zuerst der Öldruck geregelt werden, bevor die Luftgehaltsregelung aktiviert wird.

Im Folgenden sollte der Einsatz einer adaptiven Regelung oder der einer Modellfolgeregelung zur Verbesserung der Regelgüte untersucht werden. Auch der Einsatz einer Mehrgrößenregelung anstelle zweier eigenständiger Regelkreise führt durch Berücksichtigung der Kreuzkopplungen des Systems möglicherweise zu einer weiteren Verbesserung des Einschwingverhaltens des Luftgehaltes.

A Laborgerät

In diesem Abschnitt sind weitere Messungen sowohl mit dem Luftdrosselventil als auch mit der Einspritzdüse abgebildet. Die Zuordnung der Lufteinbringung zum Öl können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle A.1: Messreihen der Öle

Einbringung der Luft	Öl
Drosselventil	HLP 46
	HLP 46 LS
	HLP 46 LS (gebraucht)
	Utto LS
	Utto gebraucht(100 h)
Einspritzdüse	Basic 68
	Basic 100
	DU 46
	ZAF 46 MB
	ZAF 46 MC
	Gear ATF
	Plus Arctic

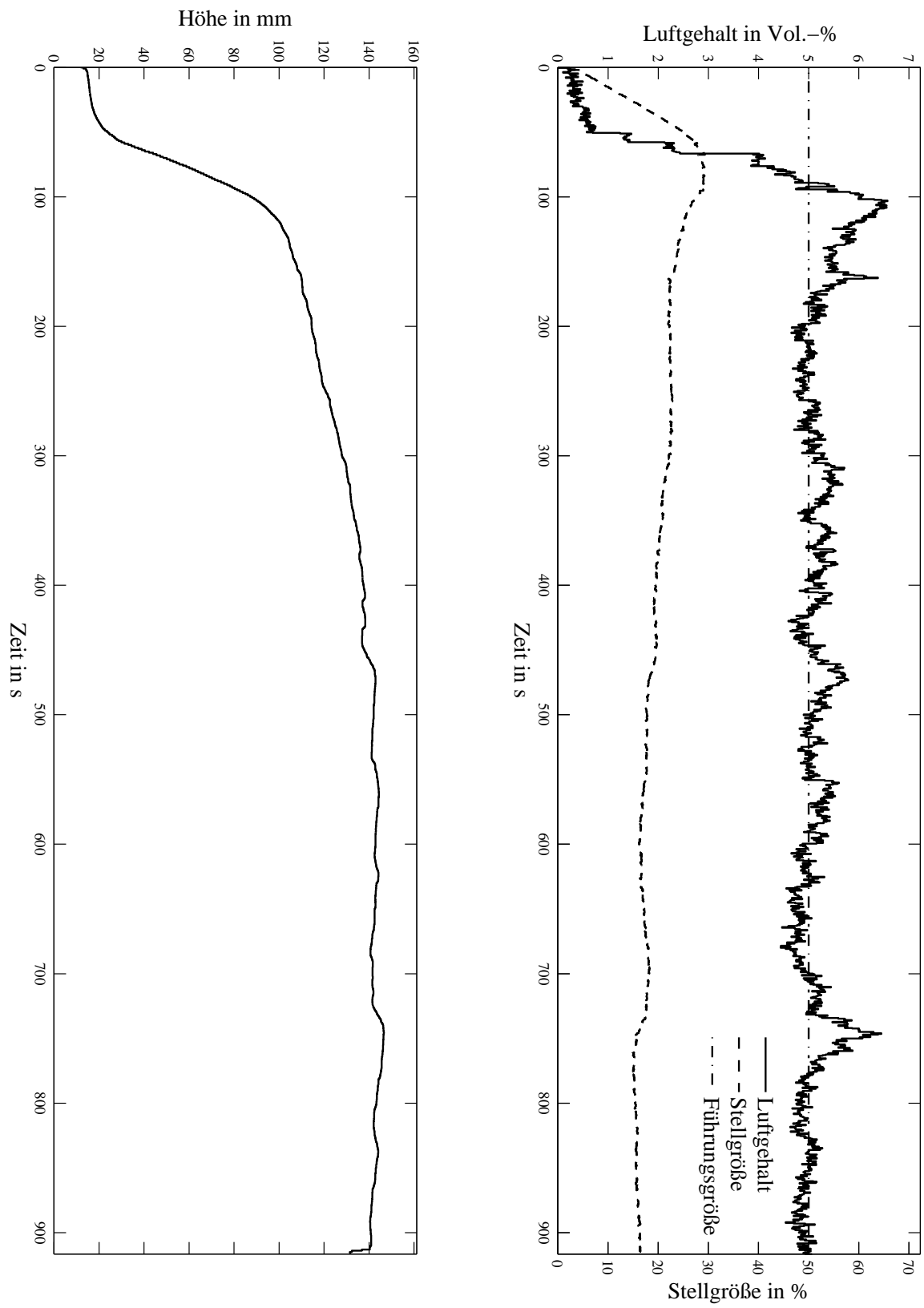


Bild A.1: HLP 46

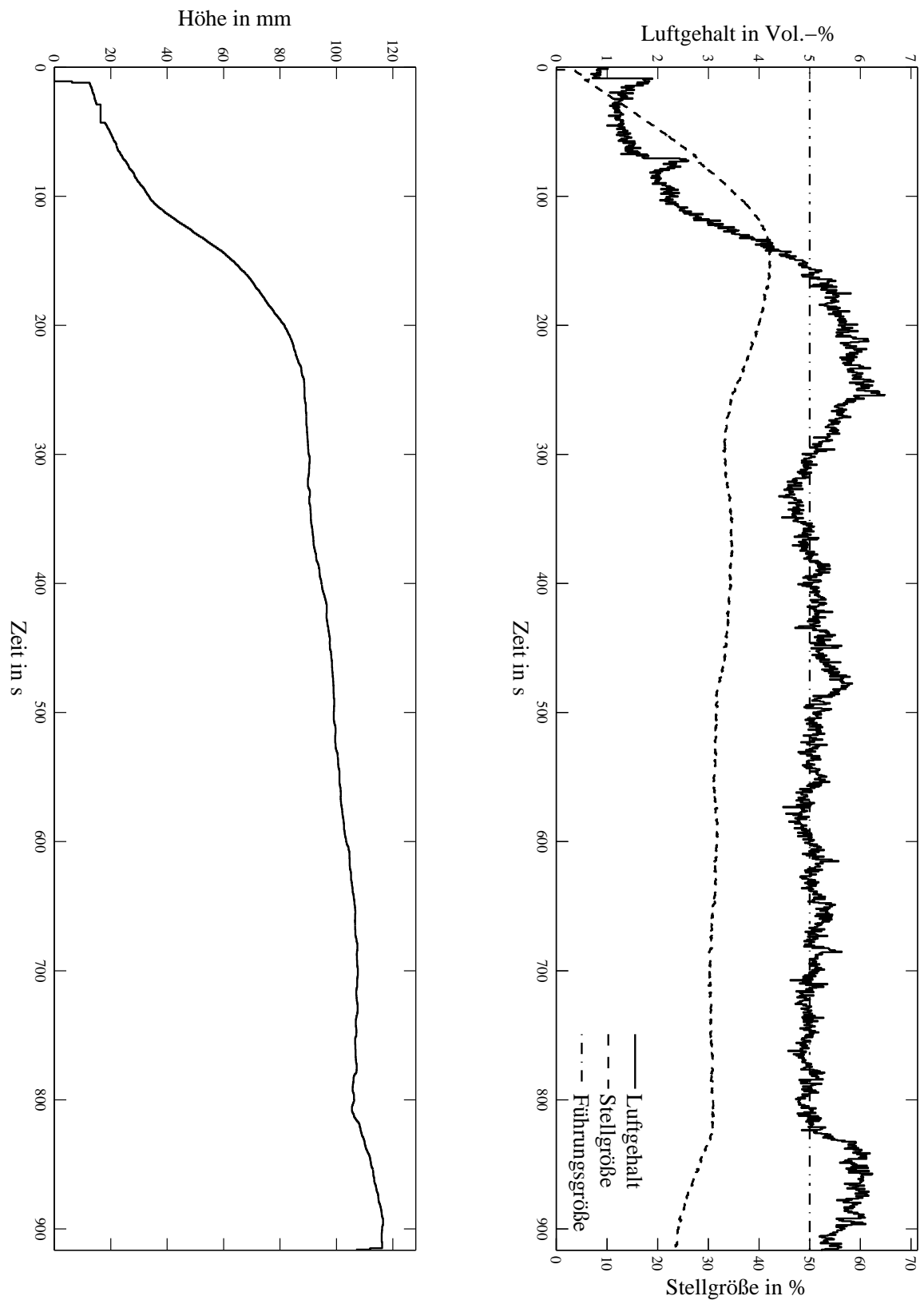


Bild A.2: HLP 46 LS

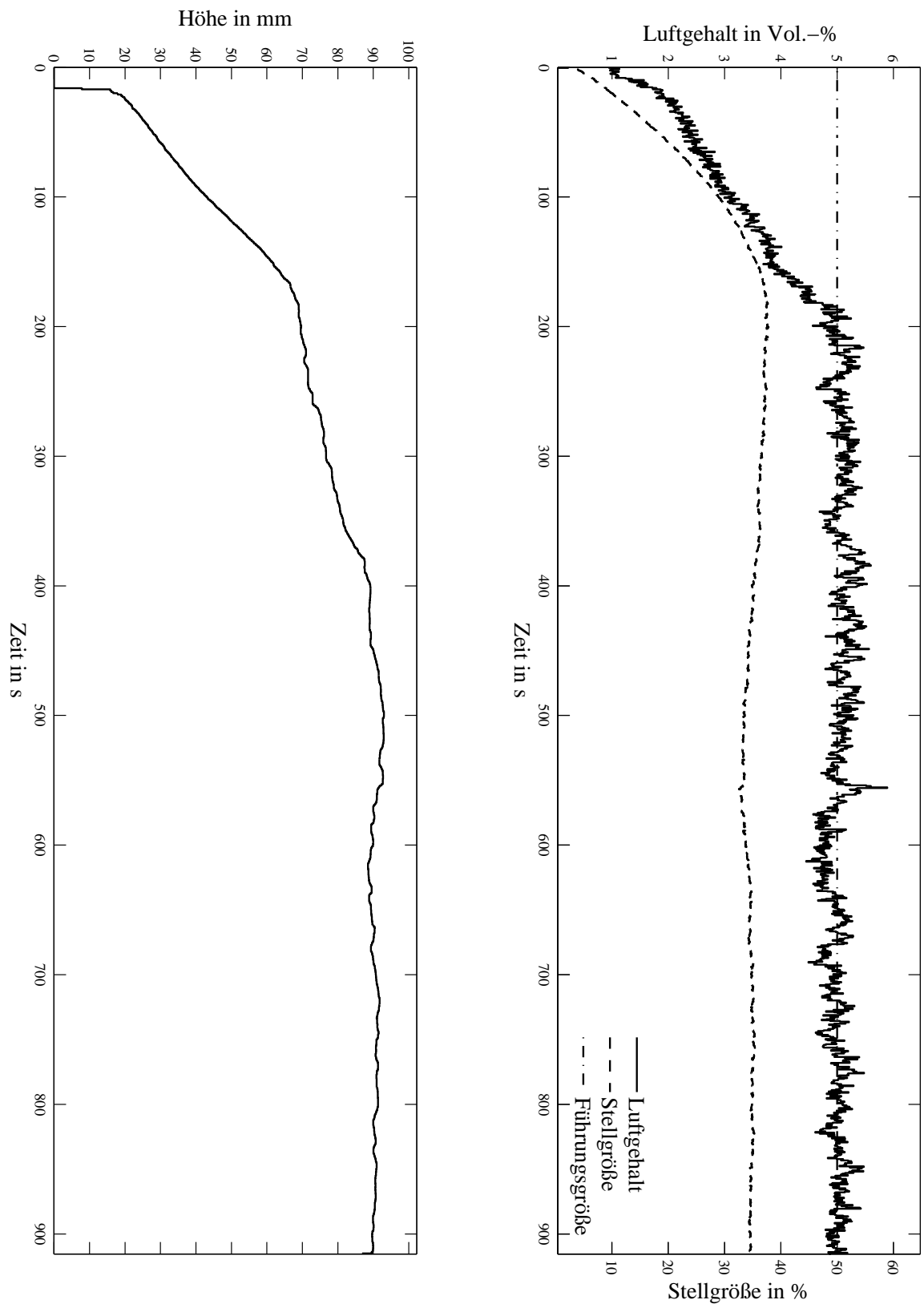


Bild A.3: HLP 46 LS gebraucht

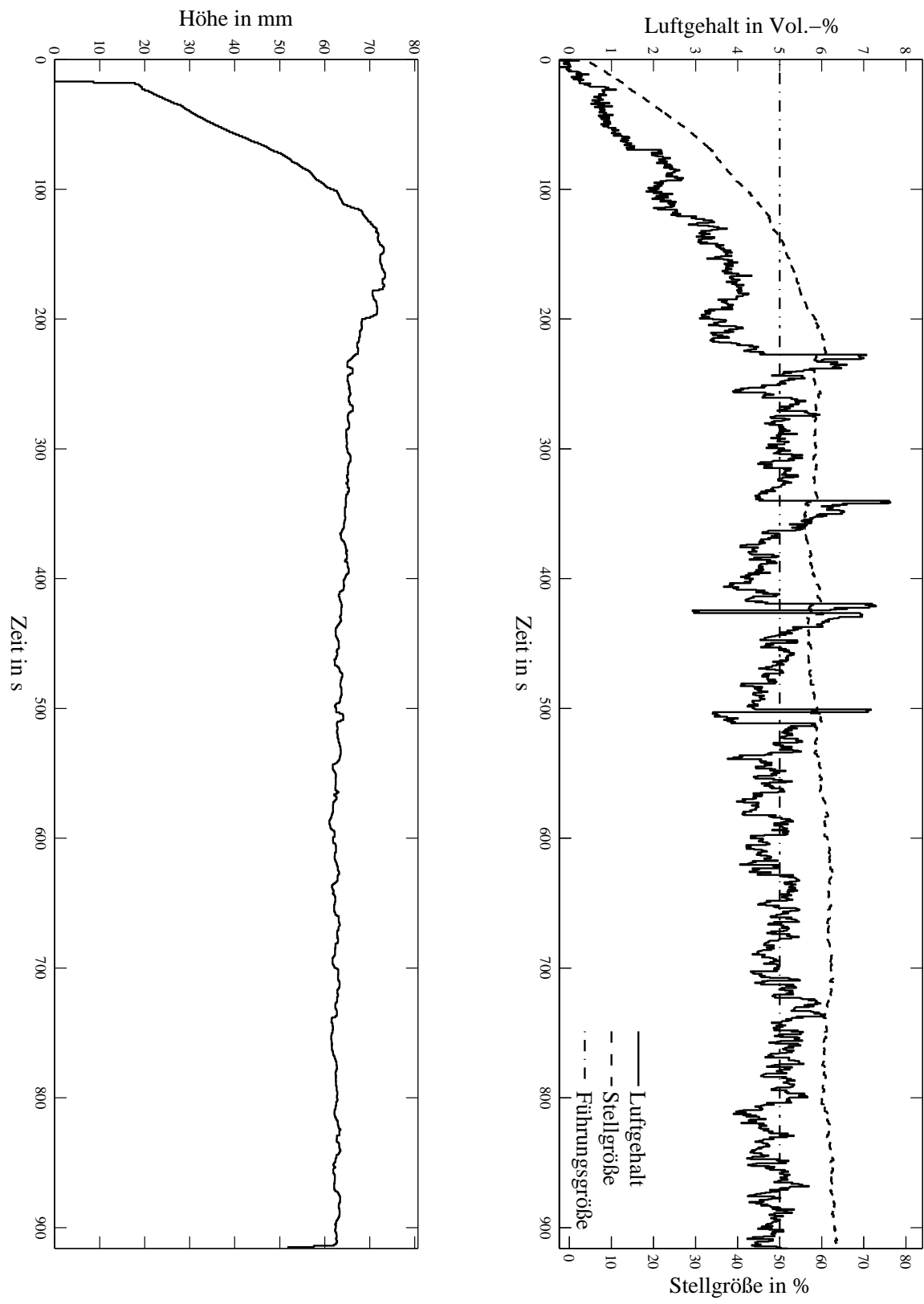


Bild A.4: Utto LS

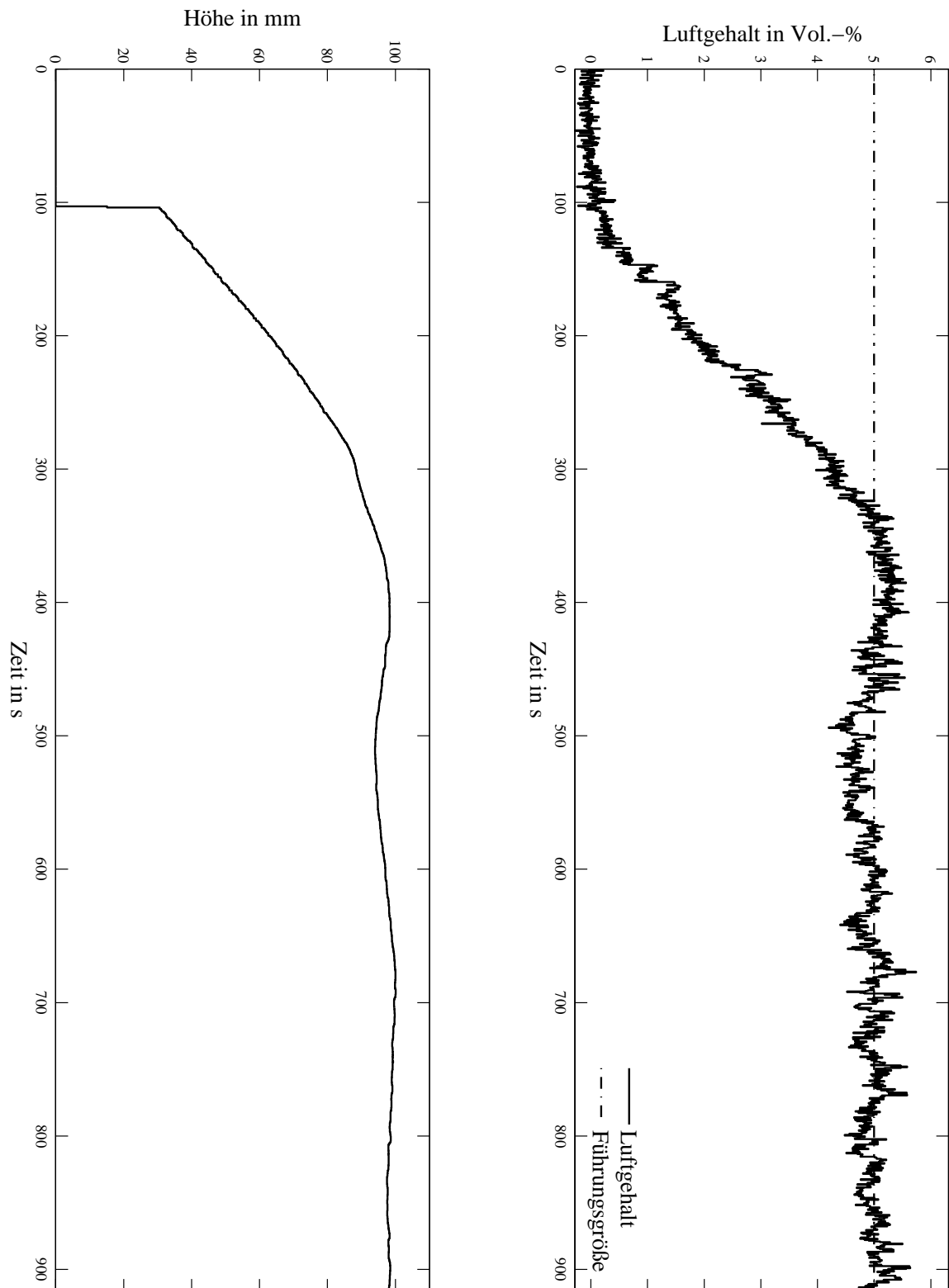


Bild A.5: Utto 100 h

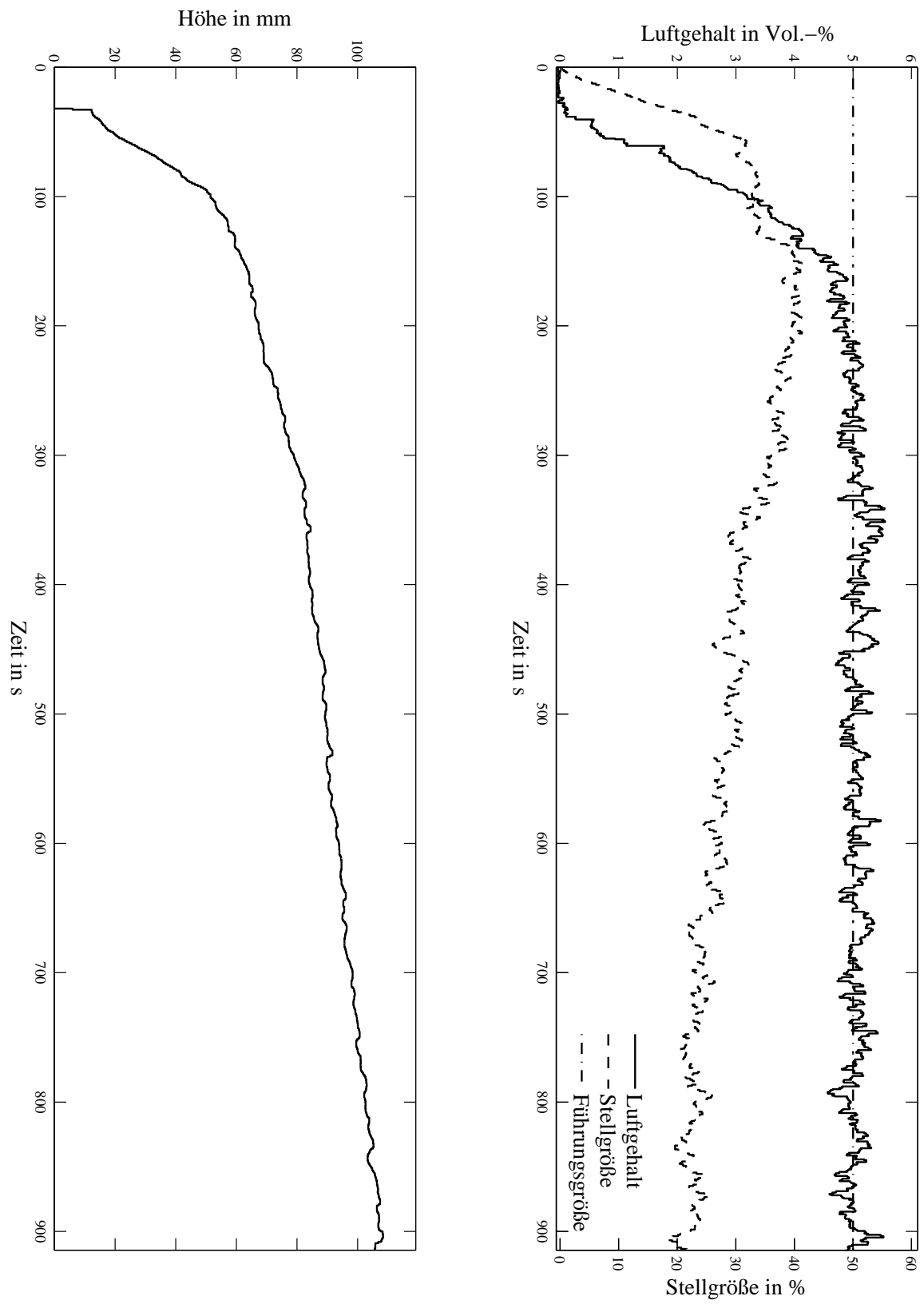


Bild A.6: Basic 68

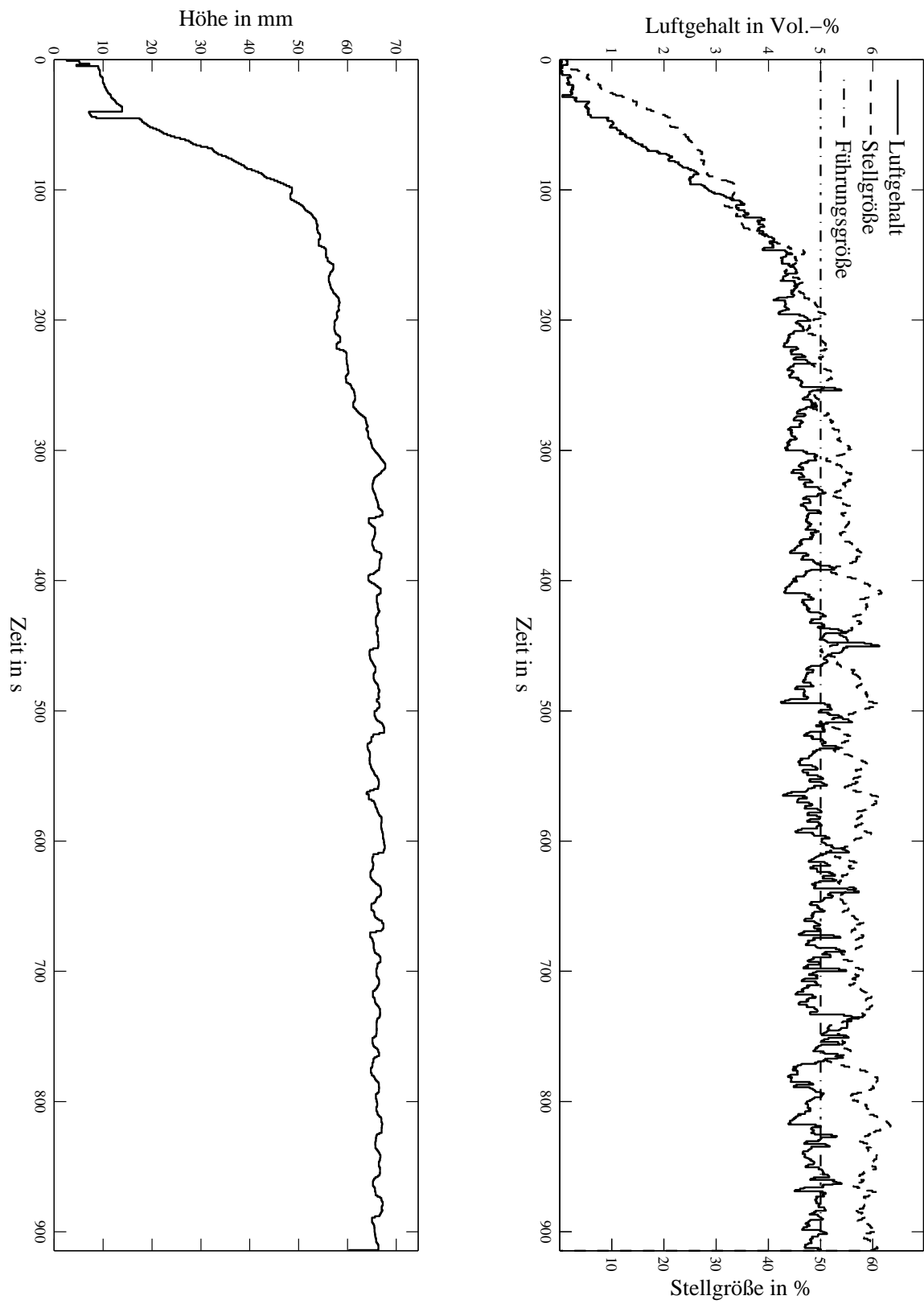


Bild A.7: Basic 100

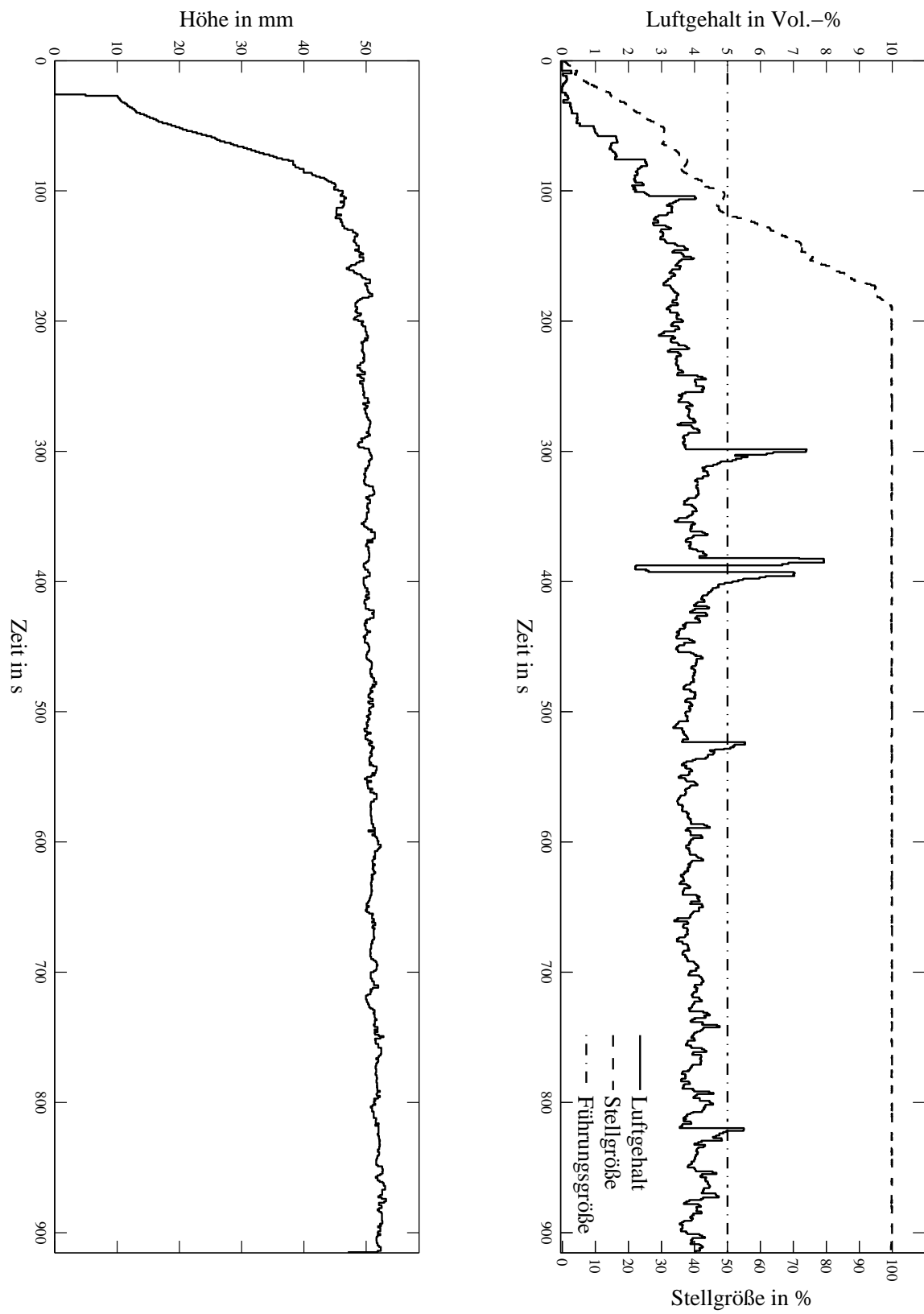


Bild A.8: DU 46

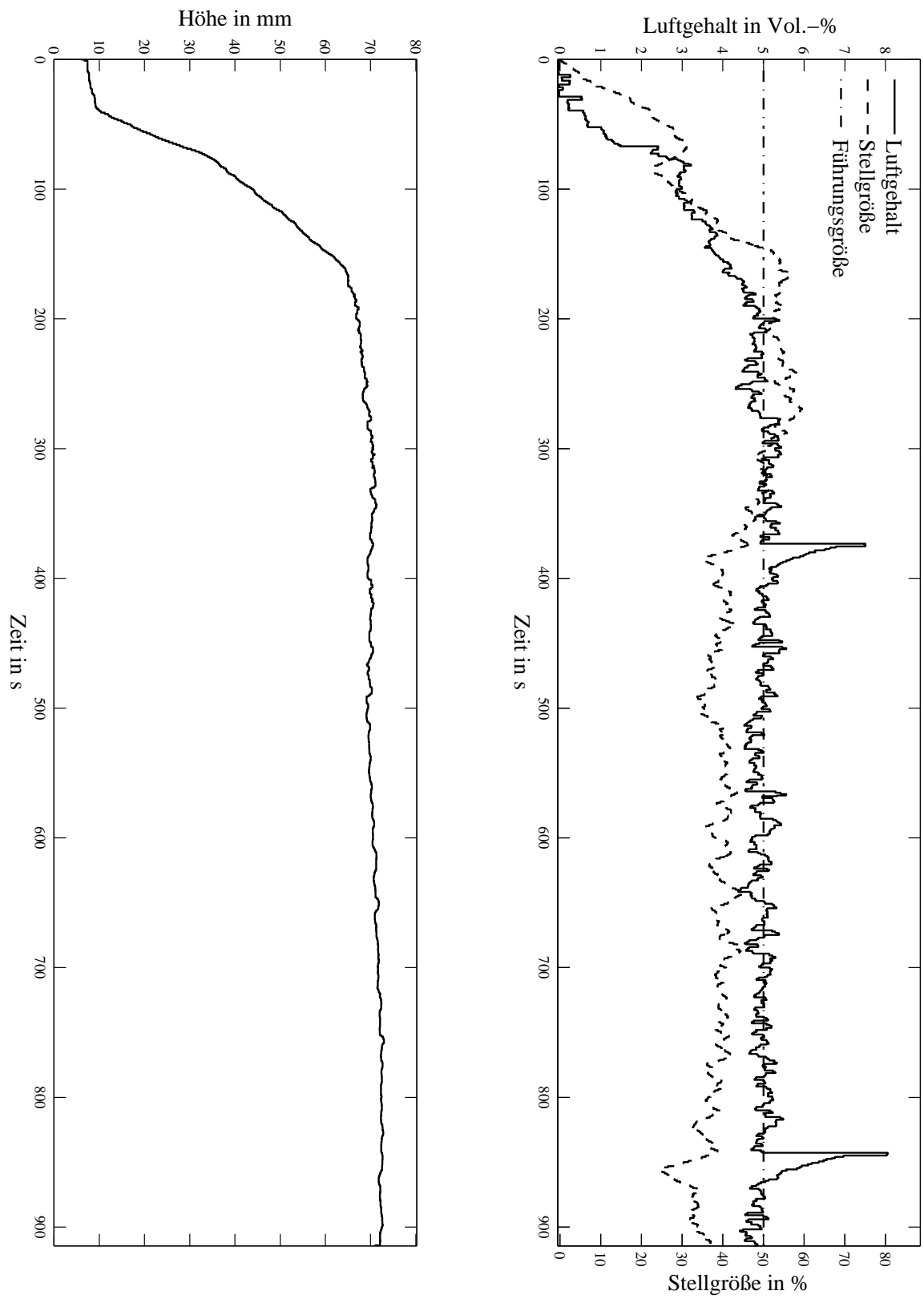


Bild A.9: ZAF 46 MB

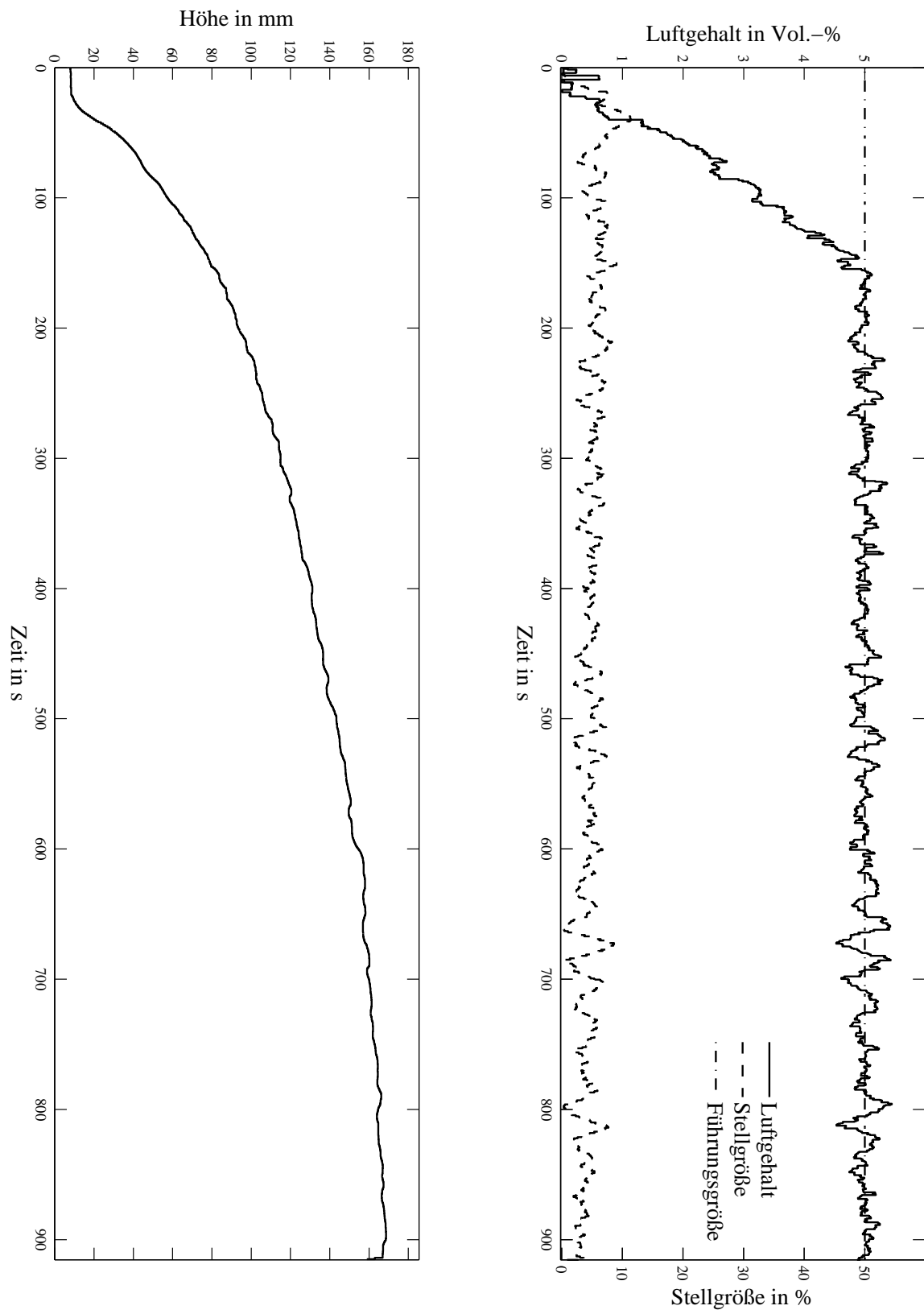


Bild A.10: ZAF 46 MC

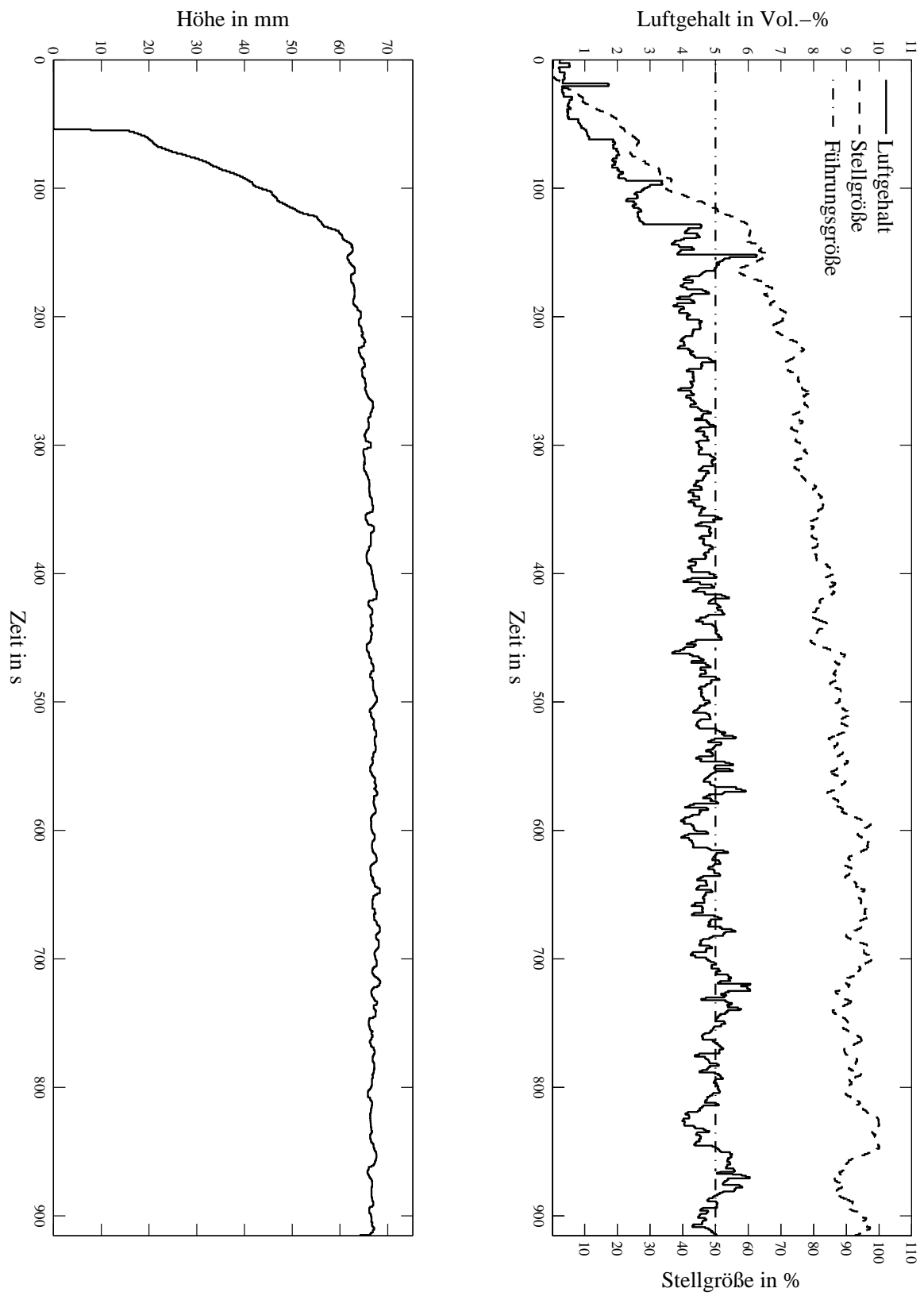


Bild A.11: Gear ATF

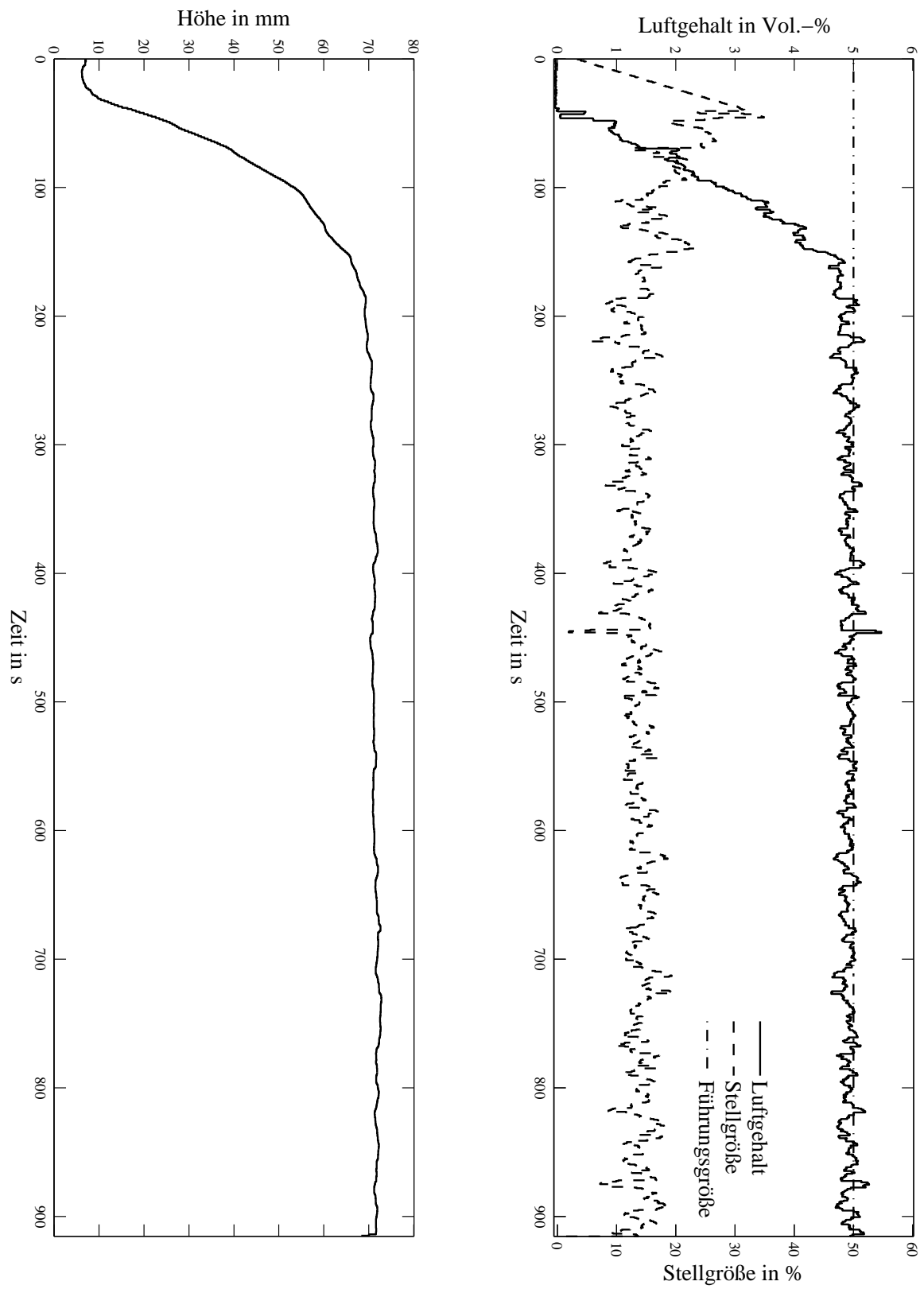


Bild A.12: Plus Arctic

B Versuchsstand

In diesem Kapitel des Anhangs finden sich die gemessenen Parameter der luftfreien Öle sowie die Messreihen zur Bestimmung der Modellparameter für den Versuchsstand.

B.1 Kapazitäten der identifizierten Öle

Für die Regelung des Luftgehaltes wird das ϵ_r aus den Abmessungen des Kondensators ohne Berücksichtigung der Randbereiche für ein luftfreies Öl bestimmt. Der Tabelle B.1 können die gemessenen Kapazitäten und berechneten Dielektrizitätskonstanten entnommen werden.

Tabelle B.1: Kapazitäten und Dielektrizitätskonstanten der identifizierten Öle

Nr.	Bezeichnung	Kapazität	berechnetes ϵ_r
1	Renolin B 15 VG 46	30,9 pF	3,1083
2	Renolin MR 46 MC	33,2 pF	3,3396
3	Hydraulik HVI	32,8 pF	3,2994

B.2 Messungen zur Identifikation

Die für die Reglerauslegung benötigten Streckenparameter sind aus den Messdaten bestimmt worden. Die aufgezeichneten Verläufe des Luftgehaltes, der Anregung sowie des Drucks auf den folgenden Seiten abgebildet.

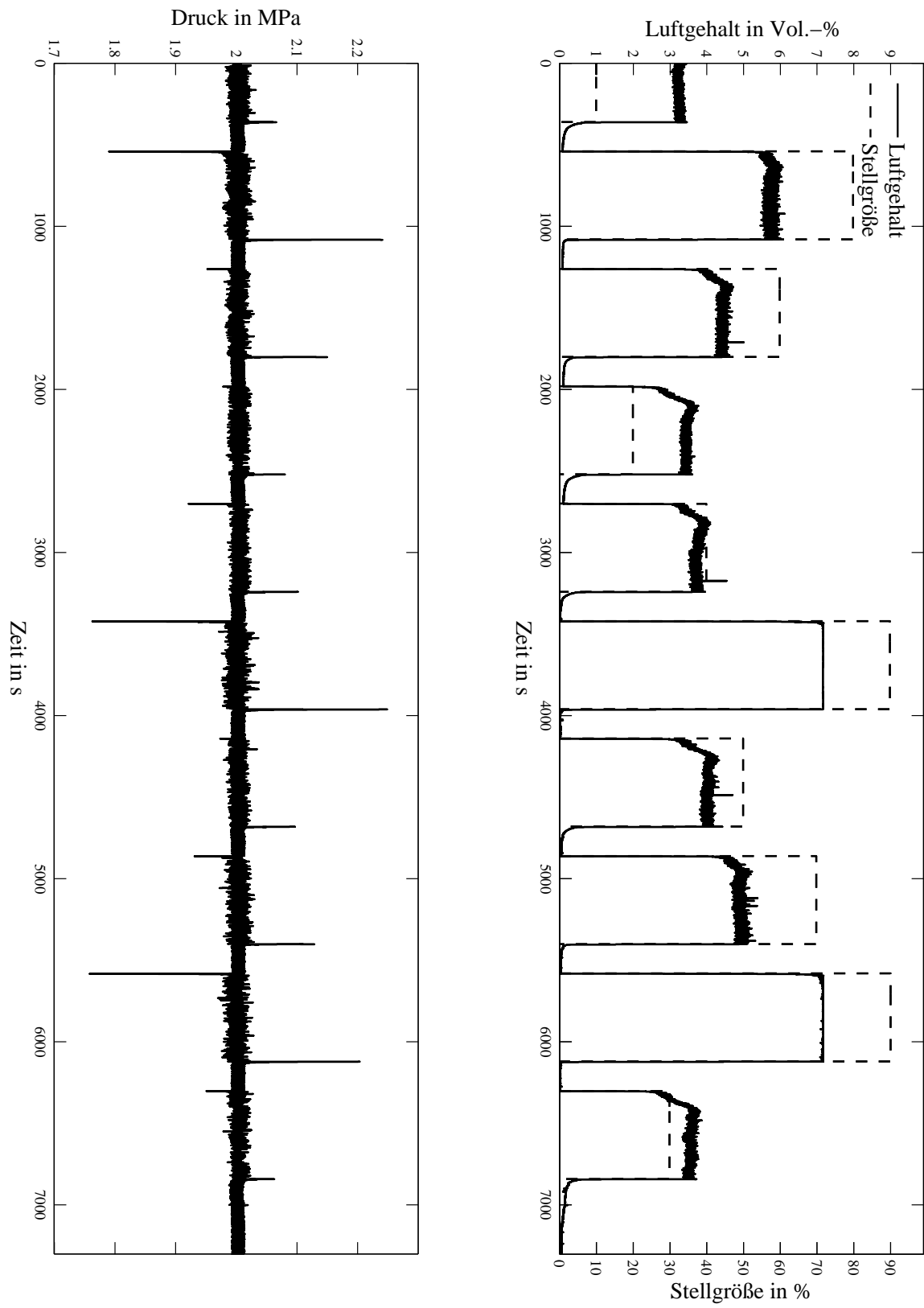


Bild B.1: Renolin B 15 VG 46

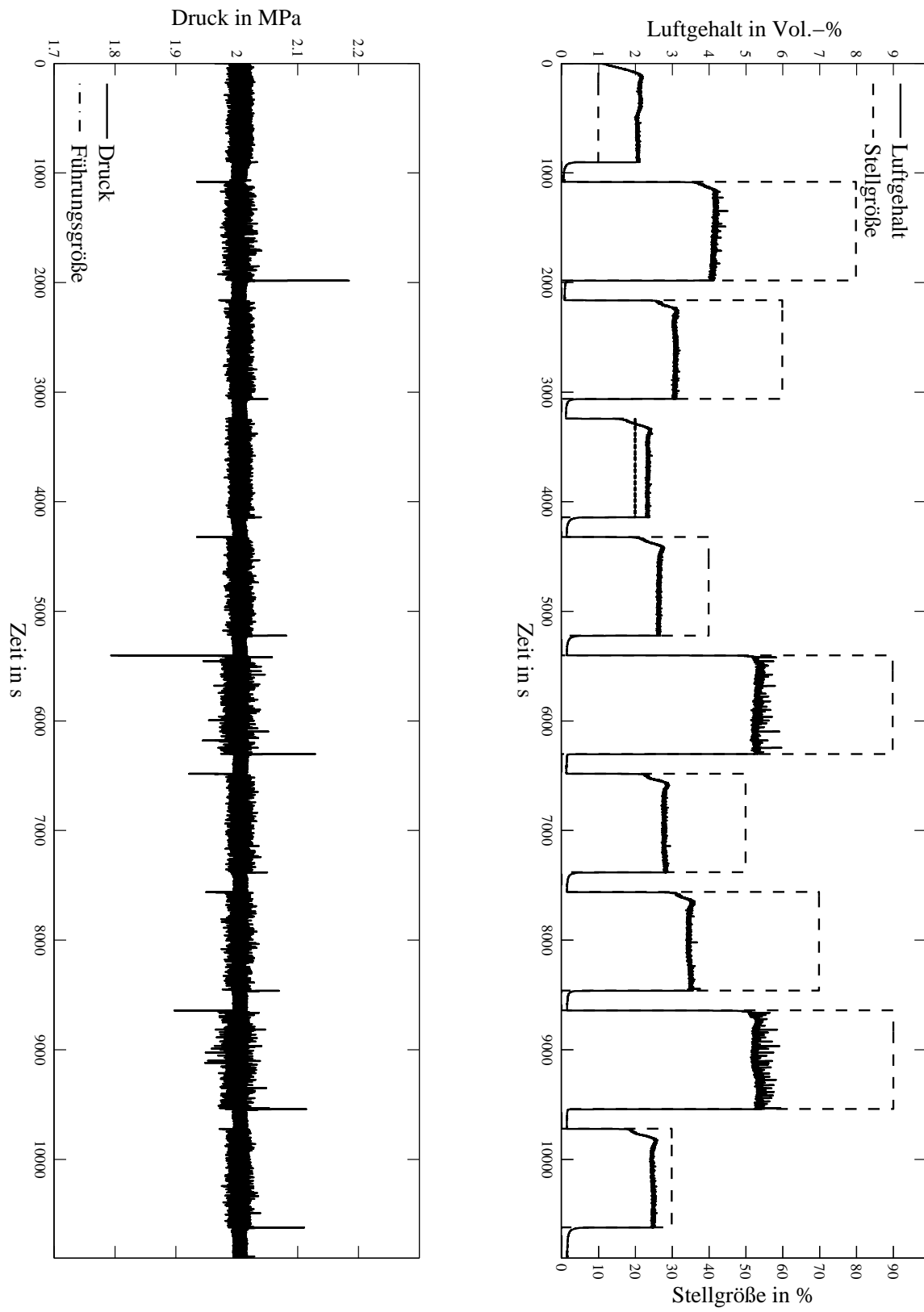


Bild B.2: Renolin MR 46 MC

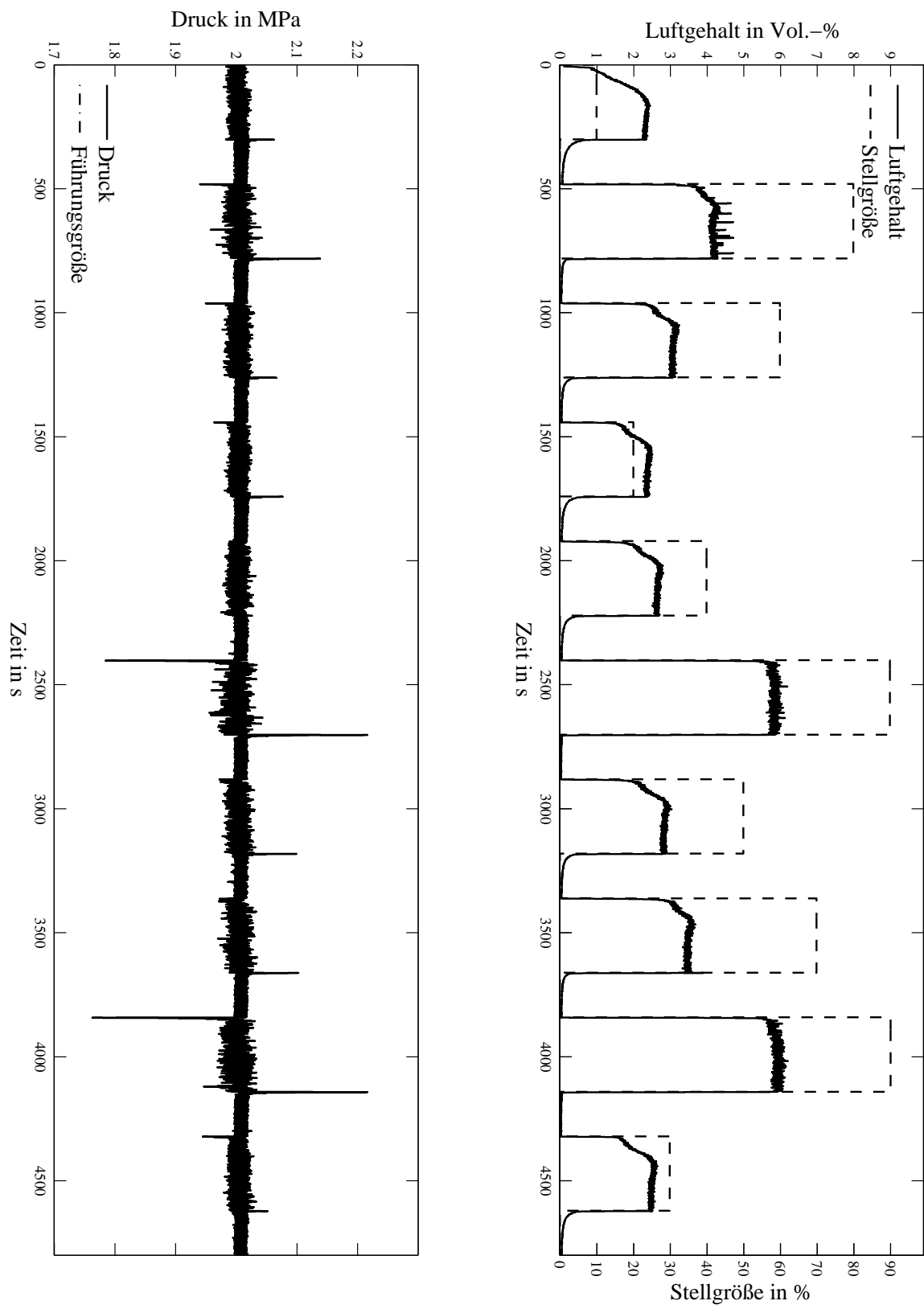


Bild B.3: Hydraulik HVI

Literatur

- [Asp82] ASPNES, D.E.: Optical Properties Of Thin Films. In: *Thin Solid Films* (1982), S. 249–262
- [AST02] ASTM D 892–02: Standard test method for foaming characteristics of lubricating oils. (2002)
- [AST07] ASTM D 3427: Standard Test Method for Air Release Properties of Petroleum Oils. (2007)
- [Bac02] BACHERT, R.: *Dreidimensionale, instationäre Effekte kavitierender Strömungen – Analyse an Einzelprofilen und in einer Radialpumpe*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2002
- [Bar79] BARTZ, J. Oppelt; W.: Einfluss von Lufteinschlüssen im Schmieröl auf die Fresstragfähigkeit und den Verschleiß von Zahnradpaarungen. In: *Abschlussbericht des FVA Forschungsvorhabens* 43 (1979)
- [Ber05] BERNDT, H.-H. Harms; W. Schumacher; R. Tutsch; J. Lechnitz; M. Gerbrandt; M.: Aufbau eines Prüfstandes zur Verschäumungsmessung an Ölen. In: *Unveröffentlichter Abschlussbericht zum ZMB-Projekt „Schaum“*, Braunschweig (2005)
- [Bro95] BRONSTEIN, K.A.; Musiol G.; Mühlig H. I.N.; Semendjajew S. I.N.; Semendjajew: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch , Frankfurt am Main, 1995
- [DIN83] DIN 51566: Prüfung von Schmierölen – Bestimmung des Schaumverhaltens. (1983)
- [DIN88] DIN 51381: Prüfung von Schmierölen, Reglerölen und Hydraulikflüssigkeiten – Bestimmung des Luftabscheidevermögens. (1988)
- [DIN04] DIN 51515: Schmierstoffe und Reglerflüssigkeiten für Turbinen. 1-2 (2004)
- [DIN06] DIN 51524: Druckflüssigkeiten; Hydrauliköle; Hydrauliköle HL; Mindestanforderungen. 1-3 (2006)
- [Föl94] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. Hüthing GmbH, Heidelberg, 1994
- [flu01] FLUCON FLUID CONTROL GMBH: *Bedienungsanleitung des CGS-Messsystem zur Bestimmung des Gasgehalts von Flüssigkeiten*, 2001
- [Fri01] FRIEDRICH FLENDER GMBH, BOCHOLT (Hrsg.): *Flender–Schaumtest*. Friedrich Flender GmbH, Bocholt, 2001

- [Ges04] GESELLSCHAFT FÜR MIKROELEKTRONIKANWENDUNG CHEMNITZ MBH (Hrsg.): *Datenblatt HT 133*. Gesellschaft für Mikroelektronikanwendung Chemnitz mbH, 2004
- [Gre06] GREGORIUS, H.: Schaum im Getriebe – Fluch oder Segen? In: *Erneuerbare Energien* (2006)
- [Har02] HARMS, H.-H.: *Vorlesungsskriptum Ölhydraulik 1*. Technische Universität Braunschweig, 2002
- [ISO99] ISO 6247: Petroleum products – Determination of foaming characteristics of lubricating oils. (1999)
- [ISO05] ISO 9120: Mineralölerzeugnisse und verwandte Produkte – Bestimmung des Luftabscheidevermögens von Dampfturbinen- und anderen Ölen (Impinger-Verfahren). (2005)
- [Kle03] KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. Hanser Fachbuchverlag, 2003
- [Kna94] KNAPPE, H.: *Nichtlineare Regelungstechnik und Fuzzy-Control*. expert verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
- [Kra05] KRALLMANN, J.: *Einsatz eines Multisensors für ein Condition Monitoring von mobilen Arbeitmaschinen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2005
- [LAU04] LAUDA DR. R. WOBSE GMBH, LAUDA-KÖNIGSHOFEN (Hrsg.): *Proline RP 855*. LAUDA Dr. R. Wobse GmbH, Lauda-Königshofen, 2004
- [Lei07] LEICHNITZ, J.: *Verschäumtes Hydrauliköl – Verfahren zur Messung des Ölverhaltens*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2007
- [Len05] LENZE AG, AERZEN (Hrsg.): *Umrichter 8200 vector*. Lenze AG, Aerzen, 2005
- [Leo90] LEONHARD, W.: *Einführung in die Regelungstechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1990
- [Lip75] LIPPHARDT, P.: *Untersuchung der Kompressionsvorgänge bei Luft-in-Öl-Dispersionen und deren Wirkung auf das Alterungsverhalten von Druckübertragungsmedien auf Mineralölbasis*, RWTH Aachen, Diss., 1975
- [Lip93] LIPSMEIER, A.: *Friedrich – Tabellenbuch Elektrotechnik/Elektronik*. Ferd. Dümmers Verlag, Bonn, 1993
- [Lue64] LUENBERGER, D.G.: Observing the State of a Linear System. In: *IEEE Transactions on Military Electronics* 8 (1964), S. 74–80
- [Lun01] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1*. Springer Verlag, 2001
- [Lun02] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 2*. Springer Verlag, 2002
- [mea] MEASX GMBH & CO. KG, MÖNCHENGLADBACH (Hrsg.): *DasyLAB Version 8*. measX GmbH & Co. KG, Mönchengladbach

- [Mül96] MÜLLER, K.: *Entwurf robuster Regelung*. B.G. Teubner Stuttgart, 1996
- [Nat04] NATIONAL INSTRUMENTS (Hrsg.): *PCI-6052E Spezifikationen*. National Instruments, 2004
- [Oeh94] OEHLER, U. Heisel; W. Fiebig; N. Mittwollen; M.: Luftblaseneinfluss auf die Schallgeschwindigkeit und Druckschwingungen in einem hydraulischen System. In: *Ölhydraulik und Pneumatik* 38 (1994), Nr. 7, S. 420–421
- [Pet45] PETERSON, B.R. Walsh; G.: An instrument for indicating the amount of gas in gas-liquid mixtures. In: *Transaction of the ASME* (1945)
- [Rab03] RABE, J.: *Miniaturisierte Quarzresonatoren und Arrays für Analytik-Anwendungen in Flüssigkeiten*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2003
- [Rau03] RAU, M.: *Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung auf Basis lernfähiger Zustandsraummodelle*, Technische Universität München, Diss., 2003
- [Roc96] ROCHOTZKI, R.: *Ellipsometrische Untersuchungen an Plasmapolymere und plasmamodifizierten Polymeroberflächen*, Technischen Universität Chemnitz–Zwickau, Diss., 1996
- [Sch70] SCHULTZ, W.: *Dielektrische und magnetische Eigenschaften der Werkstoffe*. Vieweg, 1970
- [Sch91] SCHWARZ, H.: *Nichtlineare Regelungssysteme*. Oldenbourg, 1991
- [Sch95] SCHULZ, G.: *Regelungstechnik*. Springer Verlag, 1995
- [Sch02] SCHENK, U. Tietze; C.: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer Verlag, 2002 (12)
- [Sch05] SCHUMACHER, W.: *Vorlesungsskriptum Regelungstechnik I (Nichtlineare Regelungen)*. Technische Universität Braunschweig, 2005
- [Sch06] SCHUMACHER, W.: *Vorlesungsskriptum Grundlagen der Regelungstechnik*. Technische Universität Braunschweig, 2006
- [Sie04] SIEMENS AG, MÜNCHEN (Hrsg.): *Siematic S7-300*. Siemens AG, München, 2004
- [Smi58] SMITH, D.J.M.: Feedback Control Systems. In: *Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, San Diego* (1958)
- [Sto97] STOHRER, E. Hering; R. Martin; M.: *Physik für Ingenieure*. Springer Verlag, 1997
- [Tak02] TAKAKURA, A. Mitarai; T. Ichihashi; Y.: The Circulation Type Foaming Test Method of Lubricating Oils to Simulate the Foaming Characteristics of ATF in the Automatic Transmission. In: *Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, San Diego* (2002)
- [Tut04] TUTSCH, M. Berndt; R.: An automated foam decay measurement with image processing system. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production, Erlangen* (2004)